

Hübner, Christopher

Modellgestützte Instandsetzung

DIPLOMARBEIT

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich: Maschinenbau / Feinwerktechnik

Mittweida, 2009

Hübner, Christopher

Modellgestützte Instandsetzung

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich: Maschinenbau / Feinwerktechnik

Mittweida, 2009

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ziller

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Fischer

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Bibliografischer Nachweis:

Hübner, Christopher:

Modellgestützte Instandsetzung. –2009. –68 S. Mittweida, Hochschule Mittweida,

Fachbereich Maschinenbau / Feinwerktechnik, Diplomarbeit, 2009

Referat:

Das Ziel der Diplomarbeit ist es, die Vorteile und Praktikabilität einer Modellgestützten Instandsetzung zur Reduzierung des Zeitaufwandes bei diffiziler Inbetriebnahme oder Servicearbeiten an einem Beispiel nachzuweisen. Als Demonstrator dient im Unternehmen SITEC Industrietechnologie GmbH eine preiswerte ruckbegrenzte pneumatische Zustellbewegung, welche in Abhängigkeit von Masse und Geschwindigkeit simulativ zu optimieren ist. Am Ende soll ein geeignetes rechentechnisches Mittel für die Unterstützung von Servicemitarbeitern bereit gestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

<u>Bibliografischer Nachweis</u>	<u>I</u>
---	-----------------

<u>Referat</u>	<u>I</u>
-----------------------	-----------------

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>II</u>
----------------------------------	------------------

<u>Abkürzungsverzeichnis</u>	<u>IV</u>
-------------------------------------	------------------

<u>Abbildungsverzeichnis</u>	<u>V</u>
-------------------------------------	-----------------

<u>Tabellenverzeichnis</u>	<u>VII</u>
-----------------------------------	-------------------

<u>Kurzzeichenverzeichnis</u>	<u>VIII</u>
--------------------------------------	--------------------

<u>1. Einleitung</u>	<u>1</u>
-----------------------------	-----------------

1.1	Problembeschreibung	1
1.2	Die SITEC Industrietechnologie GmbH	2
1.3	Motivation und Zielstellung der Arbeit	3
1.4	Struktur der Arbeit	4

<u>2. Theoretische Grundlagen</u>	<u>5</u>
--	-----------------

2.1	Mechatronische Montageanlagen	5
2.2	Gegenüberstellung verschiedener Zustellbewegungen	7
2.3	Pneumatische Grundlagen	9
2.4	Die Ruckfunktion	11
2.5	Spektrum von Instandsetzungsaufgaben	13
2.6	Simulation	15
2.6.1	Allgemeines	15
2.6.2	Modellbildung	15
2.6.3	Anfangswerte	18

<u>3. Umsetzung eines Beispiels zur Modellgest. Instandsetzung</u>	<u>20</u>
3.1 Gegenüberstellung preiswerte Pneumatikachse und Servoachse	20
3.2 Varianten für eine günstige schnelle Zustellbewegung	26
3.3 Aufbau eines realen Versuchsmodells	31
3.3.1 Vorbereitung des Versuches	31
3.3.2 Präsentation der Messergebnisse	34
3.3.3 Vergleich mit dem Servobetrieb	38
3.4 Aufbau Simulationsmodell für eine Einstellregel	40
3.5 Betrachtung einer Näherungsrechnung	41
3.6 Entwurf eines Simulationsmodells	43
3.6.1 Auswahl eines Programms	43
3.6.2 Vorbetrachtung des Tools	44
3.6.3 Aufbau des Modells	46
3.6.4 Ergebnisvergleich im Bezug zur Messreihe	50
3.6.5 Vor- und Nachteile der vorgenommenen Simulation	54
<u>4. Auswertung der Ergebnisse</u>	<u>55</u>
4.1 Vergleich der 3 Simulationsarten	55
4.2 Anwendungsmöglichkeiten von SimulationX	56
4.3 Empfehlungen für den Einsatz von Simulation bei der ruckbegrenzten Zustellbewegung	57
4.4 Beispiel für eine Assistenzhilfe	60
<u>5. Zusammenfassung</u>	<u>62</u>
<u>6. Ausblick</u>	<u>64</u>
<u>Literaturverzeichnis</u>	<u>65</u>
<u>Selbständigkeitserklärung</u>	<u>68</u>

Abkürzungsverzeichnis

ATB	ATB Services GmbH
BCD	Binary Coded Decimals
ECM	Electrochemical Machining
E-Motor	Elektromotor
inkl	inklusive
konst	konstant
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Recover
MwSt	Mehrwertsteuer
PC	Personal Computer
PMO	Plant Maintenance and Operation
SITEC	SITEC Industrietechnologie GmbH
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
VBA	Visual Basic

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fertigungszentrum der SITEC	2
Abbildung 2: Montage- und Prüfsysteme	2
Abbildung 3: Grundidee Modularsystem	5
Abbildung 4: Grundaufbau VarioModul®	5
Abbildung 5: Schaltungsaufbau	9
Abbildung 6: Verlauf eines Zylinderhubs	11
Abbildung 7: Proportionalwegeventil	12
Abbildung 8: Prinzip Endlagendämpfung	13
Abbildung 9: Übersicht Einsatz von Simulation	16
Abbildung 10: Vorgehensweise für die Simulationsmöglichkeiten	17
Abbildung 11: Varianten für Pneumatische Zustellbewegungen	20
Abbildung 12: Darstellung einfache pneumatische Zustellbewegung	21
Abbildung 13: Servopneumatische Steuerung	22
Abbildung 14: Vergleich Geschwindigkeitsverläufe	25
Abbildung 15: Aufbau Lösungsvariante 1	27
Abbildung 16: Funktionsdiagramm Lösungsvariante 1	27
Abbildung 17: Aufbau Lösungsvariante 2	28
Abbildung 18: Funktionsdiagramm Lösungsvariante 2	29
Abbildung 19: Aufbau Lösungsvariante 3	30
Abbildung 20: Drosselkennlinie	32
Abbildung 21: Versuchsstand	33
Abbildung 22: Geschwindigkeitsverlauf bei 3 Umdrehungen	35
Abbildung 23: Einstellung Drossel für Massen bis 10 kg	36
Abbildung 24: Einstellung Drossel für Massen ab 10 kg	36
Abbildung 25: Vorabschaltwerte für Massen bis 10 kg	37
Abbildung 26: Vorabschaltwerte für Massen ab 10 kg	37
Abbildung 27: Vergleich Geschwindigkeitskurven bei 7,7 kg	38
Abbildung 28: Einstellhilfe für Service-Techniker	40
Abbildung 29: Kräftegleichgewicht	42
Abbildung 30: Bedienoberfläche „SimulationX“	45
Abbildung 31: Aufbau des Versorgungsnetzes	46

Abbildung 32: Aufbau Rückschlagventil	47
Abbildung 33: Aufbau Antrieb und Schaltungslogik	48
Abbildung 34: Vergleich Abschaltwert bei konstanter Masse	50
Abbildung 35: Vergleich Geschwindigkeitsverläufe bei 6,75 und 11 Umdrehungen	51
Abbildung 36: Vergleich Abschaltwert über konst. Drosseleinstellung	52
Abbildung 37: Druckverlauf	53
Abbildung 38: Ermittlung Einstellwerte bei einem Hub von 500 mm	57
Abbildung 39: Vergleich mit Versuchsstand	58
Abbildung 40: Aufbau Assistenzhilfe	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Montageprozesse	6
Tabelle 2: Beispiele pneumatischer Zustellbewegungen Festo AG & Co. KG	6
Tabelle 3: Vergleich möglicher Zustellbewegungen	7
Tabelle 4: Verbrauch für einen Hub	10
Tabelle 5: Verbrauchsberechnung pro Zeiteinheit	10
Tabelle 6: Kostenvergleich pneumatischer Schaltungen	23
Tabelle 7: Gegenüberstellung Servo- und Einfachsteuerung	24
Tabelle 8: Staffelung Massen	33
Tabelle 9: Staffelung Positionierzeit	34
Tabelle 10: Ermittlung der kürzesten Positionierzeit	35
Tabelle 11: Vergleich Durchfluss	59

Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Benennung
a	m/s^2	Beschleunigung
A_d	mm^2	Drosselfläche
A_k	mm^2	Kolbenfläche
b	-	Druckverhältnis
C	$\text{dm}^3/\text{s} \cdot \text{bar}$	Leitwert
d_k	mm	Kolbendurchmesser
d_{ks}	mm	Kolbenstangendurchmesser
F_A	N	Kraft durch p_b
F_B	N	Gegenkraft durch p_o
F_k	N	Kolbenkraft
F_{Last}	N	Gewichtskraft
F_r	N	Reibkraft
j	m/s^3	Ruck
m	kg	transportierte Masse
n	Mol	Stoffmenge
n_s	-	Schaltspiele pro Minute
p	bar	Druck
p_b	bar	Betriebsdruck
$p_{Einstell}$	bar	einzustellender Druck
p_0	bar	atmosphärischer Druck
Q	l/min	Durchfluss
Q_{Amin1}	l/min	Luftverbrauch pro Schaltspiel
Q_{Amin}	l/min	Luftverbrauch pro Zeiteinheit
s	mm	Hub
T	K	absoluter Temperatur
U	V	Spannung
v	m/s	Geschwindigkeit
V	dm^3	Volumen
$x^{'}$	m	Weg
$x^{''}$	m/s	Geschwindigkeit
$x^{''}$	m/s^2	Beschleunigung
α	-	Durchflusszahl

1. Einleitung

1.1 Problembeschreibung

Zum Bereich des Sondermaschinenbaus gehören hoch automatisierte Montageanlagen, welche mit ihren unterschiedlichen Aufgaben und Bedingungen immer wieder neue Anforderungen an Entwicklung und Konstruktion stellen. Jede Anlage muss als Einzelprojekt betrachtet werden, da Handling; Transport; Prüf- und Fügeoperationen, wie Einlegen und Verschrauben, sich grundlegend unterscheiden. Wichtig dabei ist neben der Funktionalität auch die Betriebszeit zwischen zwei Fehlern (MTBF), sowie die Zeit die benötigt wird, um nach einem Fehler eine Anlage wieder in Betrieb zu nehmen (MTTR). Eine zunehmende Bedeutung erfährt dabei die Kostenfrage, welche nicht nur durch Teile-, Produktions- und Konstruktionskosten, sondern auch durch Servicearbeiten beeinflusst wird. Da Montageanlagen flexibel in Bezug auf die zu transportierenden Werkstücke sein müssen, entstehen Zeitverluste bei der Inbetriebnahme oder der Instandsetzung für verschiedene Teile unterschiedlicher Größen und Massen. Ein Problem der Teilepositionierung liegt darin, auf der einen Seite Taktzeiten gering zu halten und auf der Anderen in die Endlagen gedämpft einzufahren. Diese Dämpfung bzw. Ruckbegrenzung ist unter anderem wichtig, da in einem Modul mehrere Prozesse gleichzeitig ablaufen und sich nicht gegenseitig stören dürfen. In dem bei SITEC genutzten VARIOMODUL® werden gleichzeitig mehrere Parameter gemessen, ausgewertet und in Abhängigkeit der Messwerte, am Selbigen oder folgenden Modulen Arbeitsschritte vorgenommen. Sind jedoch die Messwerte verfälscht, entsteht Ausschuss, da z.B. eine Bohrung oder Laserschweißung fehlerhaft ausgeführt wurde. War die Anforderung an einen Zubringerantrieb bisher hoch, wurden preisintensive pneumatische Servoachsen oder elektrische Antriebe verwendet. Wurden jedoch einfache Antriebe genutzt, erfolgte manuell nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ eine Einstellung, um am Ende einen Kompromiss zwischen Taktzeit und Dämpfung zu erhalten. Dies hatte aber eine geringe Verfügbarkeit zur Folge, bedingt durch die hohe Zeit für Instandsetzungsmaßnahmen. Mit Hilfe von Modellbildung soll dieses Problem beseitigt werden.

1.2 Die SITEC Industrietechnologie GmbH

Im Jahre 1991 wurde die SITEC Industrietechnologie in Chemnitz gegründet. Die SITEC entwickelte sich vom reinen Ingenieurdienstleister zum Sondermaschinenbauer und Serienfertiger mit eigener Produktionsstätte. Ein Meilenstein war das Jahr 2001, in welchem das neue Fertigungsgebäude (Abbildung 1) errichtet wurde.



Abbildung 1: Fertigungszentrum der SITEC /SITE1/

Die bisher realisierten Anlagen umfassen den Bereich Montagesystem, Laser- und EMC Anlagen sowie dafür vorgesehene Prüfanlagen. Seit ihrer Entstehung entwickelt sich die SITEC kontinuierlich und beschäftigt heute über 170 Mitarbeiter. Im Jahr 2008 wurde ein Umsatz von 37 Mio. Euro erzielt. Ein wichtiges Geschäftsfeld sind die Montagesysteme, da in diesem Bereich immer wieder neue Anforderungen und Ziele formuliert werden, was zu kürzeren Taktzeiten und höheren Verfügbarkeiten führt. Für diese Problemfelder arbeitet die SITEC mit dem Systembaukasten VARIOMODUL®, welcher neue Maßstäbe in Sachen Flexibilität setzt. Häufige Anwendungen sind Anlagen für die Automobil- und Automobilzulieferindustrie. Es entstanden beispielsweise Anlagen zur Montage von Einspritztechnikkomponenten (Diseleinspritzpumpen, Injektordüsen) und hochautomatische Anlagen für Airbag-Generatoren sowie Prüfanlagen für Schwenkmotoren und automatische Schaltgetriebe. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2.



Abbildung 2: Montage- und Prüfsysteme /SITE2/

1.3 Motivation und Zielstellung der Arbeit

In der Diplomarbeit soll ein geeignetes Assistenzprogramm für Servicetechniker entwickelt werden. Da diese meist nicht genau mit einer vorliegenden Anlage vertraut sind, soll das Assistenzprogramm eine schnellere Reparatur und Einstellung der Anlage ermöglichen. Um Einstellparameter für Servicekräfte ermitteln zu können, ist ein Einblick in die Modellbildung nötig, um allgemein eine Aussage über Simulation und Assistenzprogramme für den Servicemitarbeiter zu erhalten. Daher wird eine pneumatische Zustellbewegung gewählt, die zeigen soll, dass auf der einen Seite eine günstige Variante nutzbar und auf der anderen diese durch Modellbildung in kurzer Zeit bei variierenden Massen im Bezug auf ihre Dämpfung einstellbar, ist. Die praktischen Untersuchungen erfolgen an einem Versuchsstand, bei dem an einem Antrieb zwei Steuerungsmöglichkeiten realisiert werden. Einmal ein Schaltungsaufbau mit Messsystem, Endlagenregelung und Proportionalwegeventil und zusätzlich ein aus der Arbeit heraus diskutierter einfacher Pneumatik-Aufbau mit Werten, die durch Simulation oder durch eine mathematisch definierte Einstellregel bestimmt werden. Zuvor muss dieser einfache Aufbau ohne Dämpfung einfahren, um einen Vergleich über den entstehenden Ruck zu erhalten. Um eine Aussage über die Qualität der herausgestellten Lösung mit Dämpfung machen zu können, wird anhand von ausgewählten Beispielen ein Vergleich mit dem preisintensiven Servobetrieb durchgeführt. Welche Art der Modellierung und Simulation bei diesem Problemfall geeignet und zudem auch noch im Sinne von Aufwand-Nutzen Verhältnis günstig ist, muss ebenfalls in dieser Arbeit herausgestellt werden. Am Ende soll ein mathematisch physikalischer Zusammenhang auf Basis eines Programms entstehen, welches auf geänderte Parameter reagiert und ein zeitaufwendiges manuelles Einstellen erspart.

1.4 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in vier große Abschnitte gegliedert.

Im ersten Teil werden die technischen und wirtschaftlichen Belange von Montageanlagen bei SITEC betrachtet. Desweiteren wird speziell auf die Möglichkeiten bei Zustellbewegungen eingegangen und daraufhin ein Vergleich herausgearbeitet. Zusätzlich wird das Arbeiten mit fluiden Substanzen erörtert und auf die Schwierigkeiten bei der Verwendung hingewiesen. In Verbindung damit wird geprüft, welche Möglichkeiten der Modellbildung bei pneumatischen Problemstellungen existieren. Im zweiten Teil ist ein Beispiel für die Modellgestützte Instandsetzung anhand eines pneumatischen Linearantriebs erläutert. Es werden zuerst die Voraussetzungen und Varianten geprüft, diese danach dimensioniert, ausgewählt und am Ende praktisch an einem Versuchstand umgesetzt. Es wird ein Versuchsplan erstellt und durchgeführt, um die experimentell bestimmten Werte für eine Einstellregel zu erhalten. Es werden drei Arten der Simulation für den vorhandenen Versuchsaufbau umgesetzt und deren Grenzen aufgezeigt. Im darauf folgenden Kapitel sollen die gewonnenen Ergebnisse dargestellt und ein Resultat für den speziellen Fall der Zustellbewegung und für die allgemeine spätere Verwendung von Simulation und Assistenzprogrammen gebildet werden.

Am Ende sollen erste Hinweise für weitere Problemfälle gegeben werden, bei welchen eine Vorbetrachtung und Berechnung über einen PC sinnvoll wären.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Mechatronische Montageanlagen

Bei der SITEC kommen Montageanlagen in den verschiedensten Variationen vor. Da im Sondermaschinenbau der Grad der Variantenvielfalt und der Individualisierung bei zu produzierenden Produkten sehr hoch ist, greift man auf das Modularsystem VARIOMODUL[®] zurück. Im Angesicht von Kostendruck, hohen Qualitätsanforderungen und kundenspezifischen Wünschen kann man mit diesem System die Entwicklungs- und Konstruktionszeit verringern. Abbildung 3 stellt die Grundidee dieses Systems dar.

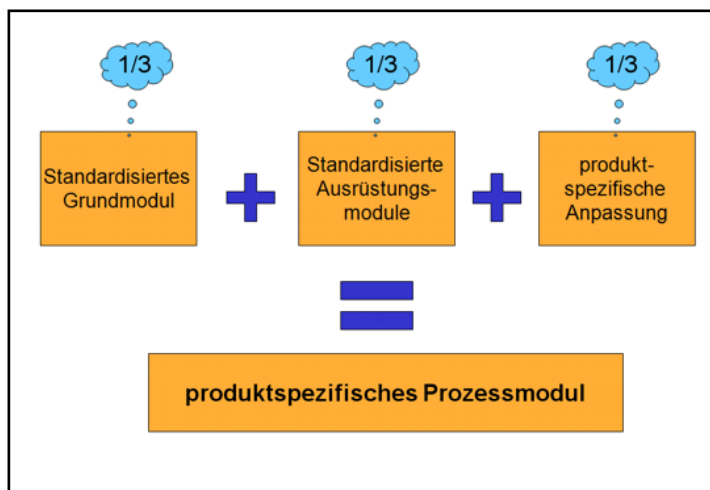


Abbildung 3: Grundidee Modularsystem /SITE3/

Ein Modul (Abbildung 4) hat eine Größe von ca. 1300/1800 x 1100 mm. Der mechanische Aufbau wird je nach Belastung und Handhabung festgelegt. Es gibt verschiedene Handhabungskonzepte z.B. Rundscharltische und Scara Roboter. Im Bereich der Steuerung wird auf ein einheitliches Bedienkonzept und standardisierte Schnittstellen zurückgegriffen.



Abbildung 4: Grundaufbau VarioModul[®] /SITE4/

Die Vorteile im Gegensatz zu herkömmlichen Montageanlagen sind:

- standardisiertes Grundmodul mit definiertem Materialfluss
- kurze Inbetriebnahme
- Variation (verschiedenste Prozesse, wie Fügen, Laserbearbeitung, Prüfen)
- hohe Verfügbarkeit durch Entkopplung der Module mit Zwischenpuffern
- dezentrale Steuerung der Funktionsbaugruppen
- schnelles umrüsten und erweitern der Module
- höchste Wirtschaftlichkeit durch wiederverwendbare Komponenten /SITE4/

Über das Modularsystem sind verschiedenste Montageprozesse, die die folgende Tabelle 1 zeigt, realisierbar:

Anforderung	Beispiele
Verbinden	Schrauben, Fügen, Pressen, Kleben , Kunststoffumspritzen
Schweißen	Laserschweißen, Widerstandspunktschweißen
Dosieren:	Fette, Öle, Kleber und Dichtungsmassen, Granulat, Flüssigkeiten
Messen/Prüfen	Kräfte, Wege, Dichtheit, Durchfluss, Spannungen, Ströme
Kennzeichnen	Laserbeschriften, Etikettieren, Ritzprägen

Tabelle 1: Montageprozesse /SITE4/

Ein wichtiger Bestandteil der Module sind die Zustellbewegungen, welche als Linear-, Schwenk- oder Rotierbewegung auftreten können. In der Diplomarbeit werden nur Produkte der Firma Festo AG & Co. KG berücksichtigt, da diese ein wichtiger Zulieferer der SITEC ist (Tabelle 2).




Typ	Beispiel	Ansicht
Linearantrieb	Kolbenstangenlose Portalachse mit Führungsverananten	
Schwenkantrieb	Schwenkflügel-Antrieb	
Rotierantrieb	Pneumatischer Rundschalttisch	

Tabelle 2: Beispiele pneumatischer Zustellbewegungen Festo AG & Co. KG

2.2 Gegenüberstellung verschiedener Zustellbewegungen

Bei Montageanlagen können Zustellbewegungen auf verschiedene Art und Weise realisiert werden, dies ist abhängig von den wirkenden Kräften, Genauigkeiten und den entstehenden Kosten. In der folgenden Tabelle 3 werden die Möglichkeiten für eine pneumatische, hydraulische und elektrische Energiezuführung gegenübergestellt.

	Pneumatik	Hydraulik	Elektrik
<i>Energieträger</i>	Luft	Öl	Elektrische Energie
<i>Energiequelle</i>	Verdichter	Pumpe	Generator
<i>Kenngrößen</i>	$p \approx 6 \text{ bar}$	$p \approx 30 \dots 400 \text{ bar}$	$U \approx 12/24 \text{ V}$ $U \approx 220/380 \text{ V}$
<i>Energie-zuführung</i>	*in stationären und mobilen Verdichtungsanlagen *Antriebe mit E-Motor *Verdichtungssysteme gewählt nach benötigtem Druck und Menge	*in stationären und mobilen Pumpanlagen angetrieben mit E-Motor *Pumpensystem gewählt nach Druck und Menge	*in der Regel überregional erzeugt
<i>Energie-speicherung</i>	bis zu großen Mengen ohne großen Aufwand möglich (Gasflaschen)	speichern schwierig, nur mit Hilfe von Luft möglich (Hydrospeicher)	speichern sehr aufwendig, max. Kleinstmengen (Akku)
<i>Energie-transport</i>	bis 1000 m möglich	bis 100 m möglich	nahezu unbegrenzte Entfernung
<i>Leckagen</i>	außer Energieverlust unproblematisch, da Luft sich in Atmosphäre löst	Energieverlust und hohe Umweltverschmutzung der Umgebung	ohne Verbindung mit anderen Teilen kein Energieverlust, ansonsten Gefahr bei höheren Spannungen

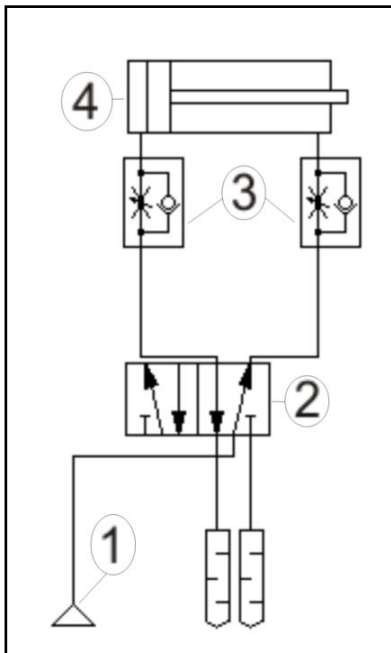
<i>Bewegung linear</i>	bis 2000 mm Hub, hohe Beschleunigung + Verzögerung	kurze Strecken üblich, gut Regelbarkeit	unbegrenzt möglich
<i>Bewegung schwenkend</i>	ähnlich wie bei Linearbewegung, bis 360° schwenkbar	über Zylinder und Schwenkantrieb einfach zu erreichen bis 360°	aus Drehbewegung abgeleitet über mechanische Glieder
<i>Bewegung rotierende</i>	*Druckluftmotoren verschiedener Bauarten *große Drehzahlbereiche	*bessere Regelbarkeit als Pneumatik dafür geringere Drehzahlen	*guter Wirkungsgrad bei rotierenden Antrieben
<i>Geschwindigkeiten</i>	bis 3 m/s	0,1 – 1 m/s	hohe Geschwindigkeiten
<i>Kraft</i>	*1 – 50 000 N wirtschaftlich *überlastbar bis zum Stillstand	*sehr hohe Kräfte *Überlastschutz durch Überdruckventil *höchste Energiedichte	*nicht überlastbar
<i>Regelbarkeit</i>	über Druck und Geschwindigkeit gut einstellbar	über Druck in großem Bereich einfach, sehr exakte Regelung der Geschwindigkeit	höherer Aufwand, aber über Regler sehr exakt möglich

Tabelle 3: Vergleich möglicher Zustellbewegungen /VOGE S.41/ /WAT S.3/

Für die SITEC bietet sich eine pneumatische Lösung an, da häufig Massen bis zu 20 kg schnell beschleunigt und bewegt werden müssen. Zudem sind im Vergleich die Handhabung einfacher und die Anschaffungskosten geringer. Die Druckluftversorgung kann nicht nur firmenintern, sondern auch bei Kunden meist einfach über ein zentrales Netz bereitgestellt werden.

2.3 Pneumatische Grundlagen

Ursprünglich wurde der Begriff aus dem Griechischen „Pneuma“ abgeleitet und bedeutet Hauch bzw. Atem. Heute bezeichnet es die Lehre und Wissenschaft der Luft, ihren Bewegungen und Bedingungen. Pneumatik ist ein Fluid, das mittels seiner Strömung Energie übertragen kann, wobei die spezifische Energie des Massenstroms in einem System übertragen und antriebsseitig in mechanische Form umgewandelt wird. /DUB S.636/



Ein grundsätzlicher Aufbau (Abbildung 5) besteht aus einer Luftdruckquelle (1), einem Wegeventil (2), zwei Drosselrückschlagventilen (3) und einem Antrieb (4).

Abbildung 5: Schaltungsaufbau /FEST/

Die Medienquelle liefert die Energie in Form von unter Druck stehender Luft (Arbeitsdruck ≈ 6 bar). Diese wird über ein Wegeventil geschaltet, welches je nach Anwendungsfall ausgewählt wird, um verschiedene Abläufe zu verwirklichen. Über die

Drosseln kann der Durchfluss Q und so einerseits der Druck ($Q = \alpha \times A_D \times \sqrt{2 \times \frac{\Delta p}{\rho}}$) und andererseits die Ausfahrgeschwindigkeit des Kolbens ($v = \frac{Q}{A_k}$) reguliert werden.

Der Linearantrieb wird durch die Länge der Zustellbewegung bestimmt. Anhand des Druckes und der Kolbenfläche wird die Kraft bestimmt, mit welcher der Antrieb wirken kann ($F_k = p \times A_k$). Je nach transportierter Masse kann die Kolbenkraft minimiert oder vergrößert werden. Aus dieser erhält man den groben Richtwert für die Beschleunigung

($a = \frac{F_k}{m}$) /WAT S.45/

Die Auslegung der Pneumatik-Elemente wird auf den Kolben bezogen, da dieser problembezogen ausgewählt wird, nach dem Prinzip „so genau wie nötig“ und nicht wie „so genau wie möglich“. Alle zu wählenden Bauteile hängen vom Durchfluss ab, welchen die Druckluftquelle liefern muss. Der dafür benötigte Luftverbrauch [l/min] lässt sich theoretisch aus der Multiplikation von Kolbenfläche, Hub und Verdichtungsverhältnis bestimmen (Tabelle 4).

Kolbenstange (einfach + doppelwirkend)	kolbenstangenlos
$Q_{Amin1} = \frac{\pi}{4} \times (d_k^2 - d_{ks}^2) \times s \times \frac{(p_b + p_0)}{p_0}$	$Q_{Amin1} = \frac{\pi}{4} \times d_k^2 \times s \times \frac{(p_b + p_0)}{p_0}$

Tabelle 4: Verbrauch für einen Hub /VOGE S.59/

Q_{Amin1}	=	Luftverbrauch pro Hub
d_k	=	Kolbendurchmesser
d_{ks}	=	Kolbenstangendurchmesser
s	=	Zylinderhub
p_b	=	Betriebsdruck
p_0	=	atmosphärischer Druck (1.01325 bar)

Um einheitliche Werte für die Verdichtungsleistung der Druckluftquelle zu erhalten, wird der Verbrauch pro Zeiteinheit und die jeweilige Zylinderart normiert (Tabelle 5).

Zylinderart	Formel
Einfachwirkend	$Q_{Amin} = n_s \times Q_{Amin1}$
Doppelwirkend	$Q_{Amin} = 2 \times (n_s \times Q_{Amin1})$

Tabelle 5: Verbrauchsberechnung pro Zeiteinheit /VOGE S.60/

Q_{Amin}	=	Luftverbrauch eines Zylinders pro min
n_s	=	Schaltspiele pro Minute (1 Schaltspiel = Vor- und Rückhub)

Für die praktische Anwendung sollte noch ein Faktor für thermische Einflüsse, Leckagen und „Toträume¹“ berücksichtigt werden (Empfehlung $\approx 1,3$).

^{*1}Druckluftzuleitungen und weitere Räume, die für den Hub nicht nutzbar sind und 20 % des Luftverbrauchs ausmachen

2.4 Die Ruckfunktion

Das Problem, das bei pneumatischen Zylindern auf Grund von hohen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten entsteht, ist der Ruck.

„Er ist die zeitliche Änderung der Beschleunigung, die zweite zeitliche Ableitung der Geschwindigkeit oder die dritte zeitliche Ableitung des Weges“ /WIK/

Das Formelzeichen des Rucks ist j (vom engl. Jerk) und hat die Maßeinheit „ m/s^3 “. Der Ruck ist ein endlicher Beschleunigungssprung, der durch einen Knick des Geschwindigkeitsverlaufs entsteht. Das heißt, dass zwei gekrümmte Wegkurven tangential ineinander übergehen, was wiederum bedeutet, dass eine Ruckbeseitigung schon bei einem Bewegungsablauf (z.B. bei einer Kurvenscheibe) zu berücksichtigen und zu minimieren ist. Weist die Beschleunigung einen unendlichen Beschleunigungssprung auf, d.h. die Geschwindigkeitskurven ändern sich sprunghaft, löst das einen Stoß aus.

/JAEGL S.37/

Bei einer Zustellbewegung ist der typische Bewegungsablauf in Abbildung 6 sichtbar.

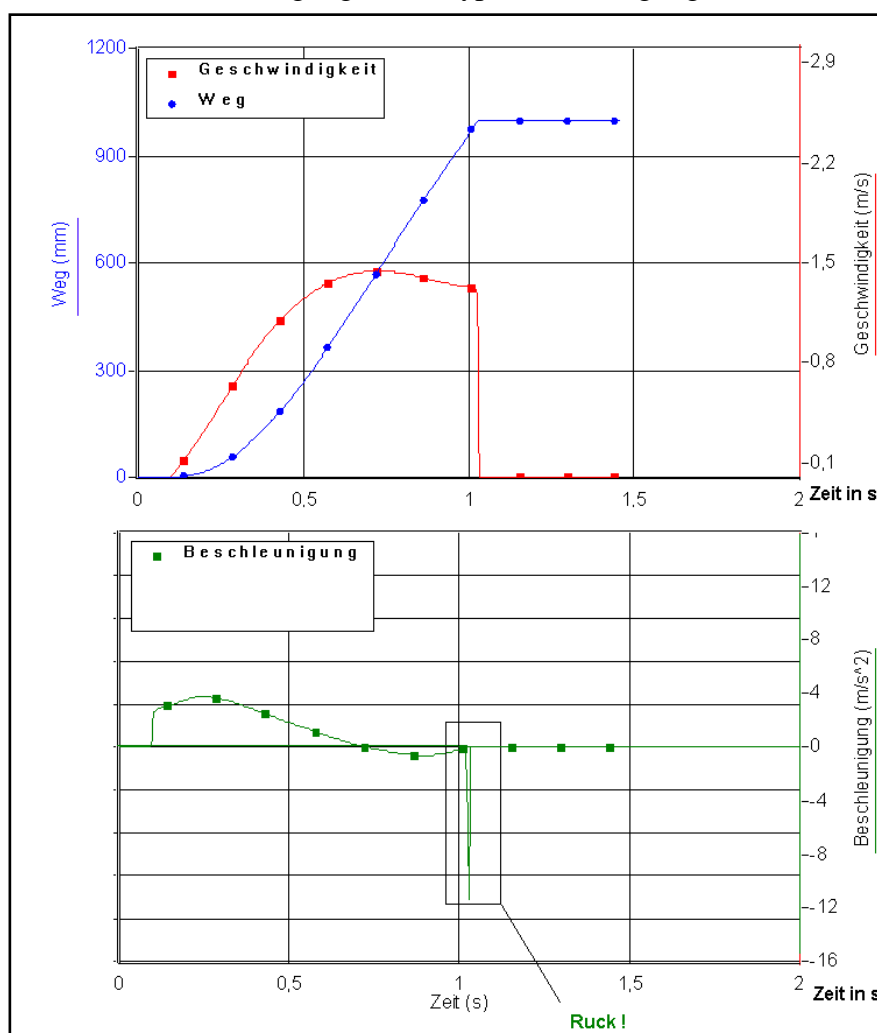


Abbildung 6: Verlauf eines Zylinderhubs /FEST/

Im zweiten Teil der Abbildung 6 wird der Beschleunigungsverlauf, welcher den gekennzeichneten Ruck aufweist, sichtbar. Dieser muss nun minimiert werden, um eine Schwingungsanregung zu reduzieren. Schwingungen haben einen negativen Einfluss auf die restliche Montageanlage. Die Literatur zeigt hierfür verschiedene Lösungsvorschläge auf. Eine erste Möglichkeit ist die allmähliche Absperrung der Luftzufuhr und des Luftaustrittes während des Hubes. Hierdurch wird ein Luftpolster in der Luftabfuhr-Kammer erzeugt und ein Schlag beim Erreichen der Endlage vermieden. Bei Antrieben mit großen Massen sind Ölbremen bzw. Stoßdämpfer beizufügen, welche aber zusätzliche Verschleißteile darstellen. /ZOEB S.13/

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ein Proportionalwegeventil (Abbildung 7) und einen Endlagenregler zu verwenden. Diese Proportionalwegeventile besitzen steuerbare Elektromagnete, so dass mehrere Positionen des Kolbenschiebers einstellbar sind. Der Vorteil dabei ist, dass man über ein Meßsystem und einen Endlagenregler das Ventil so ansteuern kann, dass dieses die Luftabfuhr minimiert bzw. ein Luftpolster erzeugt, damit der Kolben gedämpft in die Endlage fährt. Der Regler lernt sich die Endpositionen an und kann dadurch den Ruck nahezu beseitigen.

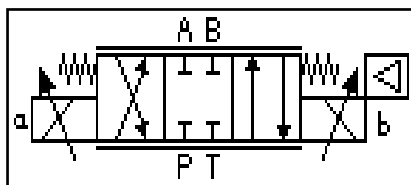


Abbildung 7: Proportionalwegeventil /ETA/

Eine weitere Chance, den Ruck zu minimieren ist, einen Antrieb mit Endlagendämpfung zu wählen, welche aber nur begrenzt einen geschwindigkeitsproportionalen Teil der kinetischen Energie beim Endanschlag kompensieren kann. Der Kolben fährt hierbei kurz vor der Endlage in eine Verengung, wobei über eine gedrosselte Luftabfuhr der Kolben gedämpft wird (Abbildung 8).

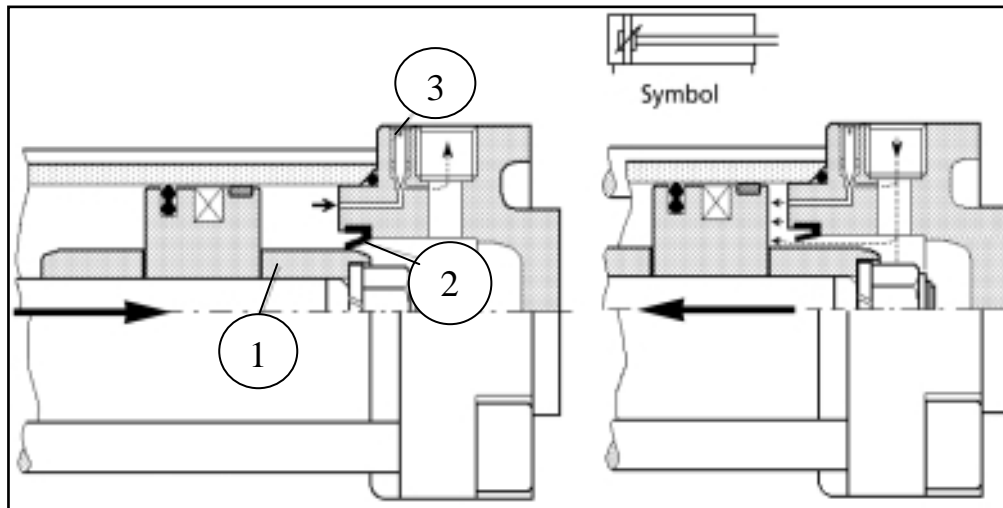


Abbildung 8: Prinzip Endlagendämpfung /LGA S.4/

- (1): Dämpfungskolben
- (2): Dämpfungsabdichtung
- (3): einstellbare Drossel

2.5 Spektrum von Instandsetzungsaufgaben

Nach der DIN 3105 bezeichnet die Instandsetzung alle Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustandes von technischen Mitteln eines Systems. Die Durchführung von Instandsetzungsaufgaben sollte nur von Fachkräften bzw. Servicemitarbeitern durchgeführt werden. Die Notwendigkeit kann aus der Tatsache einer Routine (Produktwechsel in der Anlage) oder durch einen technischen Ausfall (defekter Antrieb), heraus entstehen. Sie ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Verfügbarkeit eines Systems. Verfügbarkeit ist die Wahrscheinlichkeit „eine Einheit zu einem vorgegebenen Zeitpunkt einer Anwendungsdauer in einem funktionsfähigen Zustand zu finden“ /DIN 40041/

Weitere Faktoren für die qualitative und quantitative Erhöhung der technischen Anlagenverfügbarkeit sind Wartung und Inspektion, welche aber nicht weiter betrachtet werden sollen. Typische Aufgaben für Instandsetzung sind:

- Austausch von Anlagenteilen
- Neujustierung für geänderte Montageprozesse
- Änderung von Steuerungsparametern
(z.B. höhere Geschwindigkeit für kürzere Taktzeit)

Aus den aufgezeigten Tätigkeiten eines Servicemitarbeiters wird ersichtlich, dass Einstellarbeiten notwendig sind. Dafür gibt es bisher keine weiteren Hilfen, so dass es selbst für einen sehr gut ausgebildeten Techniker schwierig ist, bei diffizilen Fehlern und Problemen aller Art diese in ihren Ursachen und Wirkungen zu erkennen. Diese Probleme entstehen aus der Aufgabenstellung des Sondermaschinenbaus heraus. Da jede Anlage speziell auf die Kundenwünsche abgestimmt ist, sind nicht nur die Anforderungen an Entwicklung und Konstruktion hoch, sondern auch an den Techniker, welcher die Anlage in Betrieb nimmt, Reparaturen oder Einstellarbeiten ausführt. Eine mögliche Problemlösung ist, über Simulation Daten und Zusammenhänge der speziellen Anlage verfügbar zu machen, um die technische Verfügbarkeit und die Kundenzufriedenheit zu verbessern. Beispiele wo eine rechentechnische Unterstützung notwendig wäre:

- Positionierung von Näherungssensoren
- Drosselstellungen
- Dämpfungseinstellung

Einen ersten Ansatz zeigen Forscher am Virtual Development and Training Centre, welche am Beispiel des Biomasse-Heizkraftwerkes in Templin, einen so genannten PMO Service zur Verfügung stellen. Das Problem ist, die Anlage in ihrem Zustand zu erhalten und darüber hinaus den verfahrenstechnischen Prozess zu optimieren. Die Maßnahmen erfordern eine Menge von Informationen, welche in Papierform oder teilweise digital sehr umfangreich vorliegen. Die Unübersichtlichkeit und die Menge an Dokumentationen einzelner Bauteile fordern einen hohen Zeitaufwand bei der Suche nach der richtigen Information. Im Ergebnis bedeutet das zeitintensivere Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen, welche nicht eingeplant sind. Der PMO Service stellt unter Einbeziehung eines 3D-gestützten Anlagenmodells technische Unterlagen, Ersatzteilkataloge und eine Menge andere Informationen bereit. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit für die Ablage von Informationen, welche sonst nur mündlich weitergeben werden und nicht für jedermann zugänglich ist. Es ist nun möglich, schnell Informationen zu erhalten und diese visualisiert dargestellt zu bekommen. /PMO/

Für die Anlagen der SITEC ist so ein System nicht zu empfehlen, da die Entwicklungskosten einer solchen Umsetzung für eine Sondermaschine in keinem Verhältnis zu den Einsparungen bei einer Instandsetzung stehen. Das heißt, für den Fall des Sondermaschinenbaus sind Einstellhilfen und kurze Informationen günstiger, als eine aufwendige 3D-Unterstützung.

2.6 Simulation

2.6.1 Allgemeines

„Unter Simulation versteht man die Nachbildung, die Imitation von Vorgängen und Abläufen durch geeignete Computerprogramme. Grundlage jeder Simulation ist ein Simulationsmodell. Dabei unterscheidet man zwischen deterministischen, auf exakten Werten basierenden Modellen und stochastischen Modellen, die auch zufallsunabhängige Größen berücksichtigen.“ /ITW/

Bei einem so genannten „deterministischen Modell“ sind alle Werte bekannt und eindeutig, so dass das System vollständig vorausgesagt werden kann. An einem Beispiel verdeutlicht: bei der Simulation einer Kurvenscheibe sind alle Werte bekannt, da sie durch Messungen bestimmbar sind oder als Zeichnung vorliegen. Der Bewegungsablauf und dessen Ableitungen lassen sich nun genau analysieren. Wohingegen bei einem „stochastischen Modell“ sich Parameter im System befinden, welche zufällig sind, so dass sich die Simulationsergebnisse ständig ändern. Beispielsweise wäre die Simulation eines Solarsystems stochastisch, da sich die Parameter Sonneneinstrahlung und Sonnendauer täglich unterscheiden.

2.6.2 Modellbildung

Eine Simulation ist nur so gut wie das erzeugte Modell, welches den Problemfall darstellt. Ein Modell bildet die Natur in ihren wesentlichen Eigenschaften ab und vernachlässigt Einflussgrößen, welche keinen direkten Bezug auf das Endergebnis haben. Modelle werden eingesetzt, um komplexe System zu verstehen, um schon im Voraus erste Erkenntnisse über diese zu gewinnen. Über eine Systembildung können theoretische Voraussagen oder Optimierungsvorschläge getroffen werden. Ein Grund für die Simulation können auch schwer beobachtbare oder sehr gefährliche Prozesse sein, welche so auf einfachem Wege für einen Test geeignet sind. /SIMD/

Nach jeder und für jede Simulation ist zu prüfen, wie gut das Modell ist und wie nah es an die tatsächlichen Bedingungen heran kommt. Eine weitere wichtige Frage ist, in welchem Verhältnis Aufwand und Nutzen stehen. Eine grundsätzliche Antwort kann darauf nicht gegeben werden, da es für jede Problemstellung eine andere Lösung gibt.

Die unterschiedlichen Anwendungsbereiche für Simulation, sind in Abbildung 9 dargestellt.

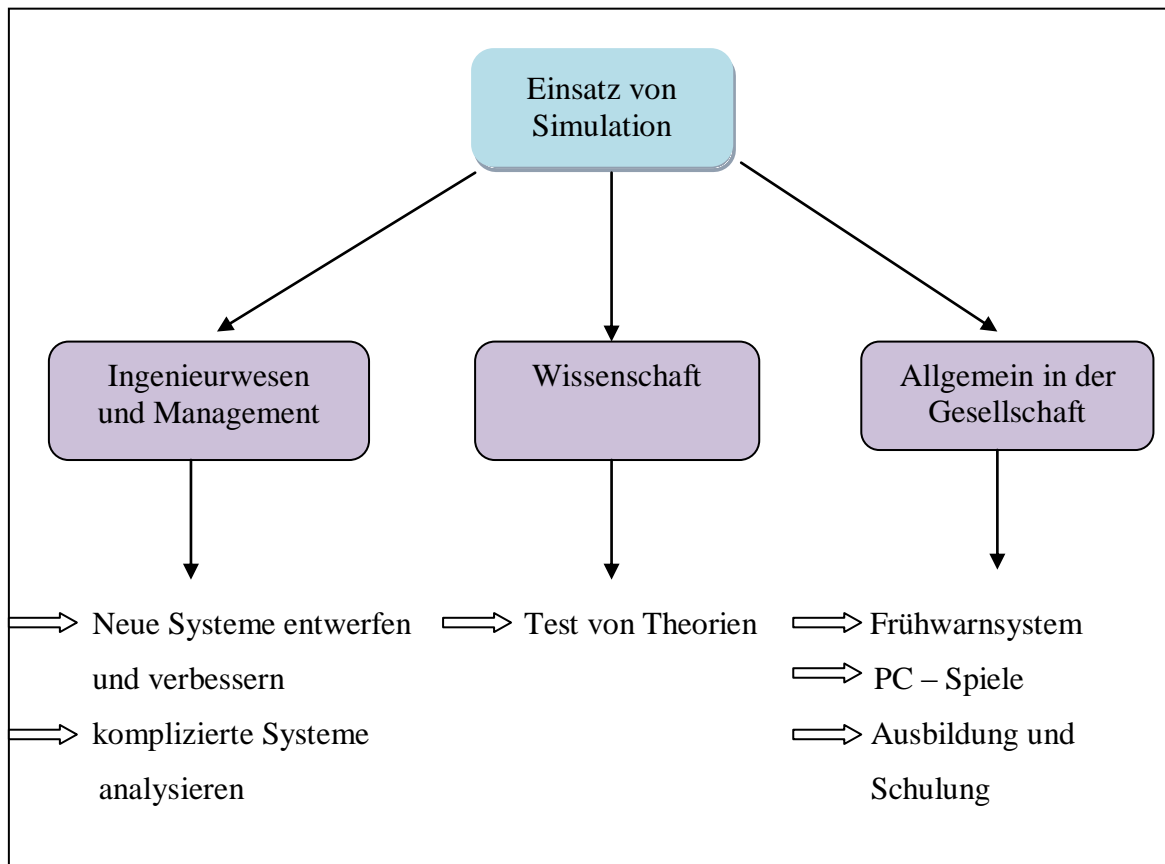


Abbildung 9: Übersicht Einsatz von Simulation (In Anlehnung an /SIMD/)

Die Diplomarbeit betrachtet drei Varianten für eine Simulation, vergleicht diese, um für die aufgezeigten Problemstellungen einen optimalen Lösungsansatz darzustellen.

Dabei soll die Simulation für das Entwickeln eines pneumatischen Systems genutzt werden. Da die Thematik der Pneumatik viele Abhängigkeiten und nichtlineare Zusammenhänge enthält, ist eine Modellbildung für ein System, das reale Ergebnisse ausgibt, sehr komplex. Für eine pneumatische Zustellbewegung an einem Versuchsstand soll ein realer Wert berechnet werden, der mit einer akzeptablen Toleranz an das zuvor simulierte Ergebnis annähert. Das Prinzip der Vorgehensweise zeigt noch einmal Abbildung 10.

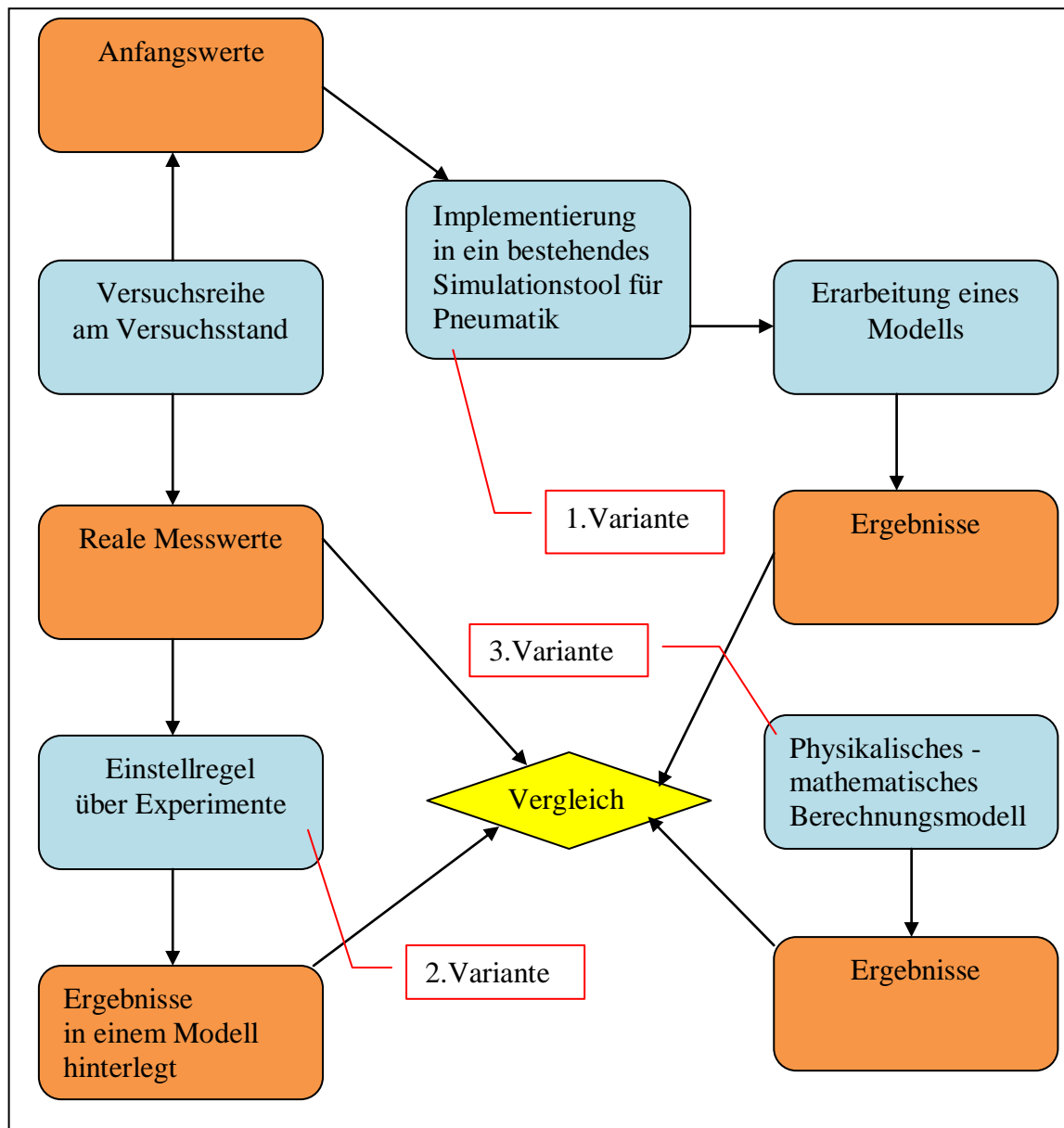


Abbildung 10: Vorgehensweise für die Simulationsmöglichkeiten

Zu Beginn werden am Versuchsstand Anfangswerte ermittelt, die die Grundlage für die Simulation bilden, woraufhin dann das Modell erstellt wird. Für diese Erstellung werden verschiedene bestehende Programme in Betracht gezogen und für die Diplomarbeit ein geeignetes ausgewählt. Als Alternative soll eine Einstellregel aus Experimenten heraus ermittelt werden, welche dann in einem ausführbaren Programm hinterlegt ist. Als letzte Möglichkeit wird eine Näherungsrechnung gewählt, um zu sehen, wie genau man mit einfachen physikalischen Verhältnissen einen Wert bestimmen kann.

2.6.3 Anfangswerte

Bevor das Modell an einem PC aufgebaut werden kann, müssen folgende Werte festgelegt bzw. experimentell ermittelt werden.

Reibwertmessung:

Die Reibung muss für die Simulation betrachtet werden, um das Anfahrverhalten charakterisieren zu können. Für die Ermittlung dieses Wertes gibt es in der Literatur verschiedene Vorschläge. Die vorhandenen Methoden gliedert man in direkte und indirekte Messverfahren. Bei einem direkten Verfahren wird über einen Kraftsensor die Reibgröße bestimmt. Für die Diplomarbeit nutzt man eine indirekte Methode, indem man in definierten Abschnitten den Druck direkt am Anschluss des Antriebes erhöht und wartet bis der Kolben in Gleitreibung übergeht. Aus dem Verhältnis von Druck und Kolbenfläche lässt sich nun die Reibkraft ermitteln. Die Reibkraft berechnet sich über folgende Formel:

$$F_r = (p_{Einstell} - p_0) \times A_k$$

$p_{Einstell}$ = einzustellender Druck

p_0 = atmosphärischer Druck

A_k = Kolbenfläche /ESCH S.3/

Ein Problem, das entsteht, ist der Stick-Slip Effekt^{*1}, welcher es im Mischreibungsbereich schwierig macht, eine genaue Messung durchzuführen. Der Vorteil dieser Methode ist, dass der Prüfzylinder selbst als Aktor fungiert und die Reibwerte im tatsächlichen Betrieb aufgenommen werden. /ESCH S.3/

Durchflussmessung:

Für den Antrieb und die Wegeventile gibt man bei der Pneumatik nach der ISO 6358 den Leitwert C und ein Druckverhältnis b an. Der Leitwert eines pneumatischen Bauelements ist das Verhältnis aus Massenstrom zum Produkt aus Betriebsdruck und Dichte bei überkritischer Strömung. Das Druckverhältnis b gibt an, wann der maximale Massestrom erreicht wird. Diese Werte können bei den Herstellern erfragt und für das jeweilige Beispiel eingepflegt werden. Beide beschreiben das vollständige Durchflussspektrum eines pneumatischen Widerstandes. Weiterhin müssen Messungen mit den Drosseln gemacht werden, damit ein Verhältnis für Drosselstellung und Durchfluss gebildet werden kann und diese für die späteren Simulationen nutzbar sind. Im Experiment erhält man genauere Werte im Gegensatz zu vorliegenden Datenblättern, da alle Widerstände der Anlage einfließen.

1: Übergang von Haft- in Gleitreibung

Masse des Antriebs:

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die zu transportierte Grundmasse. Diverse Halterungen am Antrieb haben mit ihrer Masse großen Einfluss auf das Ergebnis und müssen auch bei der Simulation berücksichtigt werden.

Druck:

Um für die späteren Betrachtungen eine gute Berechnungsgrundlage zu erhalten, muss an dem Anschluss des Antriebes eine Druckmessung gemacht werden, um die Differenz zur Druckquelle zu erhalten und den Verlust im System einrechnen zu können.

Für weitere Überlegungen könnte auch der Druck, der durch das Verringern des Durchflusses an der Drossel entsteht, gemessen werden bzw. berechnet werden. Für den korrekten Ablauf der Simulation ist diese Messung nicht unbedingt erforderlich, aber bei diversen Problemstellungen könnte eine nähere Betrachtung von Nutzen sein.

3. Umsetzung eines Beispiels zur Modellgestützten Instandsetzung

3.1 Gegenüberstellung preiswerte Pneumatikachse und Servoachse

Für die Modellgestützte Instandsetzung soll als Beispiel eine preiswerte pneumatische Zustellbewegung dienen, welche in ihre Endlage gedämpft einfahren soll. Die Umsetzung erfolgt in einem Versuchsstand, durch welchen Erkenntnisse für das reale Verhalten eines Pneumatikzylinders gewonnen werden können. Um eine preiswerte Lösung bewerten zu können ist ein Vergleichsaufbau nötig, wofür eine Servoachse dienen soll. Als Vergleichswerte werden die Kosten, die Geschwindigkeit, die Gesamtverfahrenszeit und der Ruck beim Einfahren in die Endlage benutzt. In der Diplomarbeit wird nur auf die Ausfahrbewegung eingegangen, da sich die Einfahrbewegung analog verhält. Beide Varianten werden denselben Linearantrieb steuern. Für Pneumatische Antriebe gibt es verschiedene Bauformen (Abbildung 11).

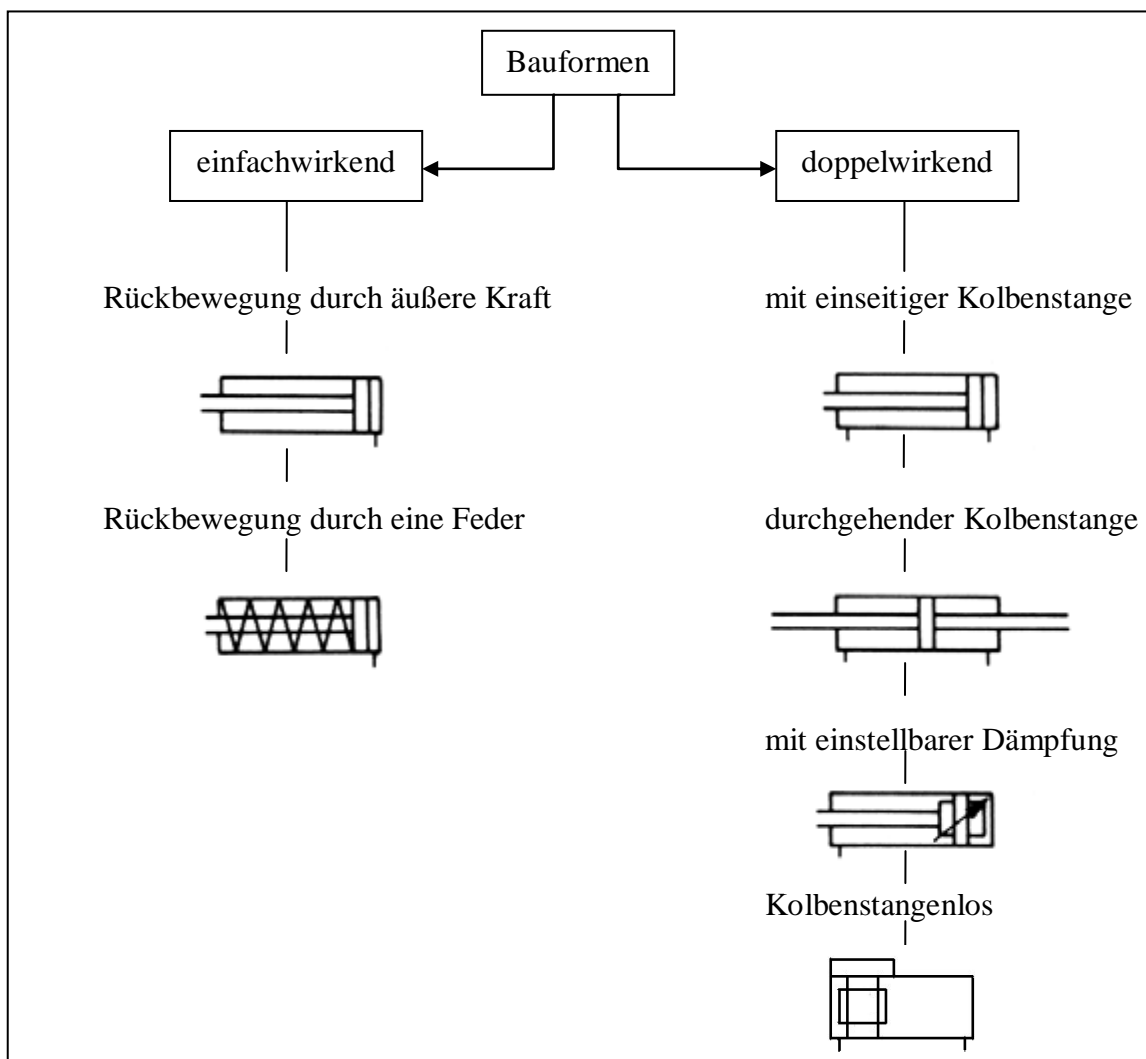


Abbildung 11: Varianten für Pneumatische Zustellbewegungen /KRET/ /FLUI/

Für den Versuchsstand wurde ein doppelwirkender kolbenstangenloser Zylinder mit einem Hub s von 1000 mm und einem Durchmesser d_k von 25 mm gewählt. Die Einbaulage soll für die Experimente horizontal sein. Der komplette Versuch wird in beiden Fällen über eine zentrale Speicherprogrammierbare Steuerung realisiert. Die preiswerte Lösung soll über das Zusammenspiel von Ventilen, Drosseln und Näherungssensoren ein praktikables Ergebnis liefern. In Vorbetrachtungen wurde eine maximale Geschwindigkeit von 1,5 m/s festgelegt. Mit dem gewählten Antrieb und einem Betriebsdruck von 6 bar bei einem maximalen Gewicht von 15 kg, wäre eine theoretische Beschleunigung von 20 m/s^2 möglich. Das bedeutet nach ca. 0,1 s wäre die festgelegte Geschwindigkeit erreicht. Den grundsätzlichen Aufbau zeigt Abbildung 12.

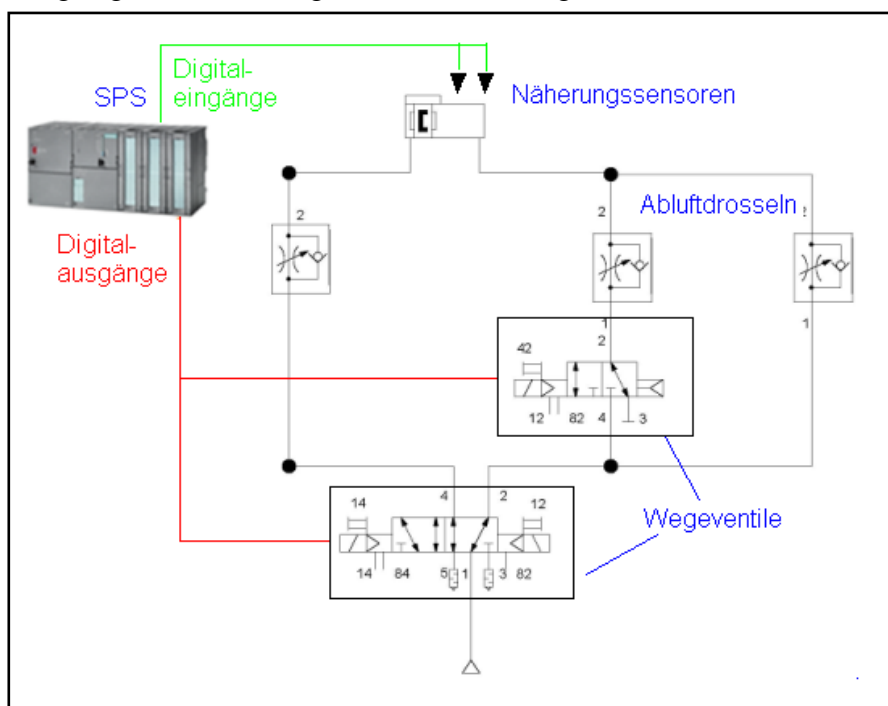


Abbildung 12: Darstellung einfache pneumatische Zustellbewegung

Die Vergleichslösung basiert auf dem Prinzip einer Regelung. Über die SPS wird bei dieser Variante kein Ventil, sondern ein Endlagenregler angesteuert. Dieser ist wiederum mit einem analogen Messsystem und einem Proportionalwegeventil verbunden. Dem Regler können nun manuell Positionen angelehrt werden. Für das Beispiel wurden eine Startposition sowie eine Endlage festgelegt. Dem Regler müssen 3 Parameter gegeben werden, damit dieser schnell sowie ruckfrei verfährt. Diese Werte sind in Abhängigkeit vom Gewicht und der verwendeten Bauteile aus einer vom Hersteller vorgegebenen Tabelle auszuwählen. Zuerst ist eine Verstärkerstufe zu wählen, welche das Beschleunigungsverhalten charakterisiert.

Weiterhin ist eine Dämpfungsstufe anzugeben, welche das Einfahrverhalten bestimmt. Der letzte Wert ist ein Systemparameter, der durch den gewählten Antrieb festgelegt ist. Das Messsystem wurde passend mit einem Hub von 1000 mm ausgesucht und liefert ein Signal von 0 bis 10 V. Über ein Proportionalwegeventil kann der Endlagenregler nun den Linearantrieb steuern. Das Ventil wurde mit einem Nenndurchfluss von 700 l/min, nach empfohlenen Herstellerangaben, ausgewählt. Über einen Soll-Ist-Vergleich kann der Regler nun den gewünschten Verlauf erzeugen und über Signale sowie Spannungswerte die Ausgänge und die Volumenströme einstellen. Abbildung 13 zeigt den grundsätzlichen Aufbau dieser Lösung.

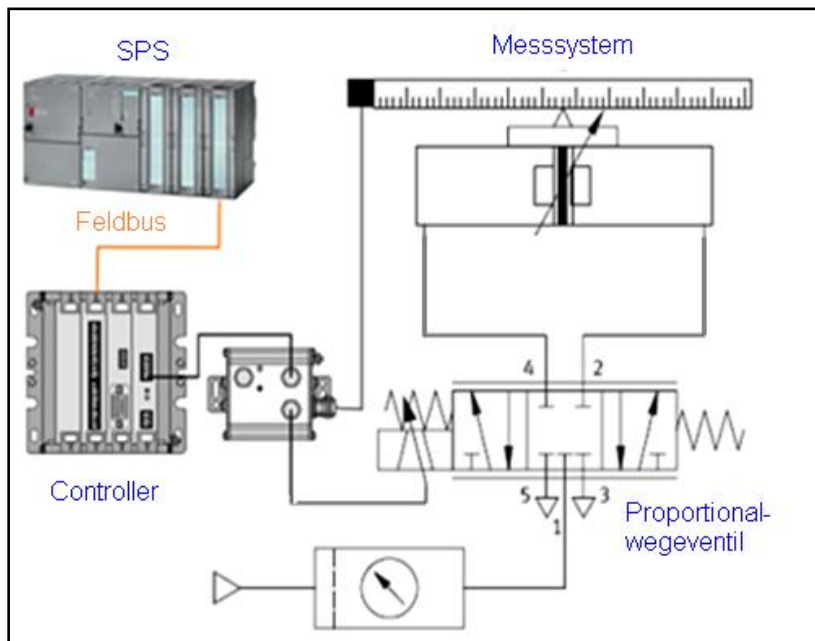


Abbildung 13: Servopneumatische Steuerung /KÖHL S.62/

In der Praxis ist es notwendig, die Anforderungen einer Anlage im Bezug auf Positioniergenauigkeit, Anzahl von Positionen und Endlagendämpfung zu kennen. Im Falle einer Aufgabenstellung für mehrere anfahrbare Positionen, die evtl. variabel sind, liefert die Servopneumatische Lösung das beste Ergebnis. Jedoch kann bei einfachen Zustellbewegungen auch eine preiswerte Lösung ausreichend sein. Um dies entscheiden zu können, sind die Kosten ein wichtiges Kriterium. In der nachfolgenden Tabelle 6 werden zwei Varianten in ihren Anschaffungskosten gegenübergestellt. Da bei beiden Fällen Steuerung, Kleinteile (z.B. Schläuche) und pneumatische sowie elektrische Energie benötigt werden, werden diese bei der Berechnung außer Acht gelassen. Alle Bauteile werden von der Firma Festo AG & Co. KG verwendet, sodass die Preise gegenübergestellt werden können.

In der Diplomarbeit wird nur auf die Ausfahrbewegung und deren Dämpfung eingegangen, für eine reale Anlage sollte ebenfalls eine Dämpfung in Einfahrriichtung in Betracht gezogen werden. Der Hintergrund dafür sind schwingungssensible parallele Abläufe sowie die Schonung von Anschlägen und Antrieb. Jedoch ist eine einseitige Dämpfung auch vorstellbar, die Entscheidung muss daher für jede Problemstellung neu getroffen werden. In dem Kostenvergleich wird eine beidseitige Endlagendämpfung betrachtet. Die folgende Aufstellung soll als Rechnungsbeispiel dienen, um eine Vorstellung für die Kosten pneumatischer Bauteile zu erhalten.

Einfache Pneumatiksteuerung			Servosteuerung		
a) ohne Dämpfung					
Bauteil	Anzahl	Gesamtkosten (inkl. MwSt.)	Bauteil	Anzahl	Gesamtkosten (inkl. MwSt.)
Wegeventil	1	81,70 €	Endlagenregler	1	321,50 €
Steckdosenkabel	2	23,20 €	Sub-D Stecker	1	50,00 €
Drossel-Rückschlagventil	2	65,80 €	Wegmesssystem	1	405,30 €
Näherungsschalter	2	69,60 €	Proportional wegeventil	1	389,00 €
Gesamtkosten: 240,30 €			Anschlusssteckdose	1	15,60 €
b) mit integrierter Dämpfung			Gesamtkosten: 1181,40 €		
Bauteil	Anzahl	Gesamtkosten (inkl. MwSt.)			
Wegeventil	3	245,10 €			
Steckdosenkabel	6	69,60 €			
Drossel-Rückschlagventil	4	131,60 €			
Näherungsschalter	4	139,20 €			
Gesamtkosten: 585,50 €					

Tabelle 6: Kostenvergleich pneumatischer Schaltungen

Bei den einfachen Pneumatik-Grundsaltungen fallen bei einer integrierten Dämpfung, im Vergleich zu einer Steuerung ohne Dämpfung, Mehrkosten von 345,20 € an. Dieser Betrag könnte sich halbieren, was davon abhängt, ob es sich um eine einseitige oder beidseitige Ruckbegrenzung handelt. Der Kostenunterschied zwischen dem einfachen gedämpften Pneumatikaufbau und der Servosteuerung beträgt 595,90 €. Da in einer Anlage mehrere Zustellbewegungen vorhanden sind, steigt die Differenz der Kosten enorm an, welche die Investitionsentscheidung wesentlich beeinflusst.

Ein weiterer Betrachtungspunkt sind die möglichen Vor- und Nachteile bei der Anwendung (Tabelle 7).

	Vorteile	Nachteile
<i>Servo- steuerung</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Einnahme von Zwischenpositionen ➤ gute Regulierung von Geschwindigkeit und Beschleunigung ➤ interne + externe Teachfunktionen ➤ Ermittlung von Systemkennwerten der angeschlossenen Komponenten (z.B. Geschwindigkeitsverlauf) ➤ Speicherung von Positionen ➤ einfache Inbetriebnahme 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ hohe Anschaffungskosten ➤ höhere Energiekosten gegenüber einfachen Ventilen ➤ Neuprogrammierung bei Änderungen (hohe MTTR)
<i>Einfache Pneumatik- steuerung</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ preiswert ➤ einfache Integration in Ventilinseln ➤ geringer Aufwand bei Umbauten 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ schwer positionier- und einstellbar ➤ problematische Endlagendämpfung

Tabelle 7: Gegenüberstellung Servo- und Einfachsteuerung

Aus den Tabellen 6 und 7 geht hervor, dass eine Lösung für eine pneumatische Zustellbewegung preiswert möglich ist, gegenüber einem System mit Endlagenregelung, es aber einstellbar gemacht werden muss. Das heißt, man muss einen Lösungsweg finden, um die Position der Näherungssensoren, die zu verfahrenende Masse und die zu erzielende Positionierzeit in Abhängigkeit zu bringen.

Für die Kalibrierung der Linearachse ist eine Einstellmöglichkeit nötig, welche aus der Diplomarbeit heraus entstehen soll. Um ein nutzbares Ergebnis zu erhalten, sollten die Einflussfaktoren so gewählt werden, wie sie in Bezug auf Instandsetzungsaufgaben variiert auftreten können. Dabei sollte im Fokus der Betrachtung und Bewertung eine gut gedämpfte Endlagenpositionierung sein. Die Wertung und Beurteilung wird in Bezug auf den Geschwindigkeit-Zeit-Verlauf vollzogen, da in diesem alle Parameter, welche als bedeutend angesehen werden, ablesbar sind. Abbildung 14 zeigt 2 Verläufe, einmal das Verhalten ohne bzw. mit zu geringer Dämpfung und einen Ablauf, wie er angestrebt wird.

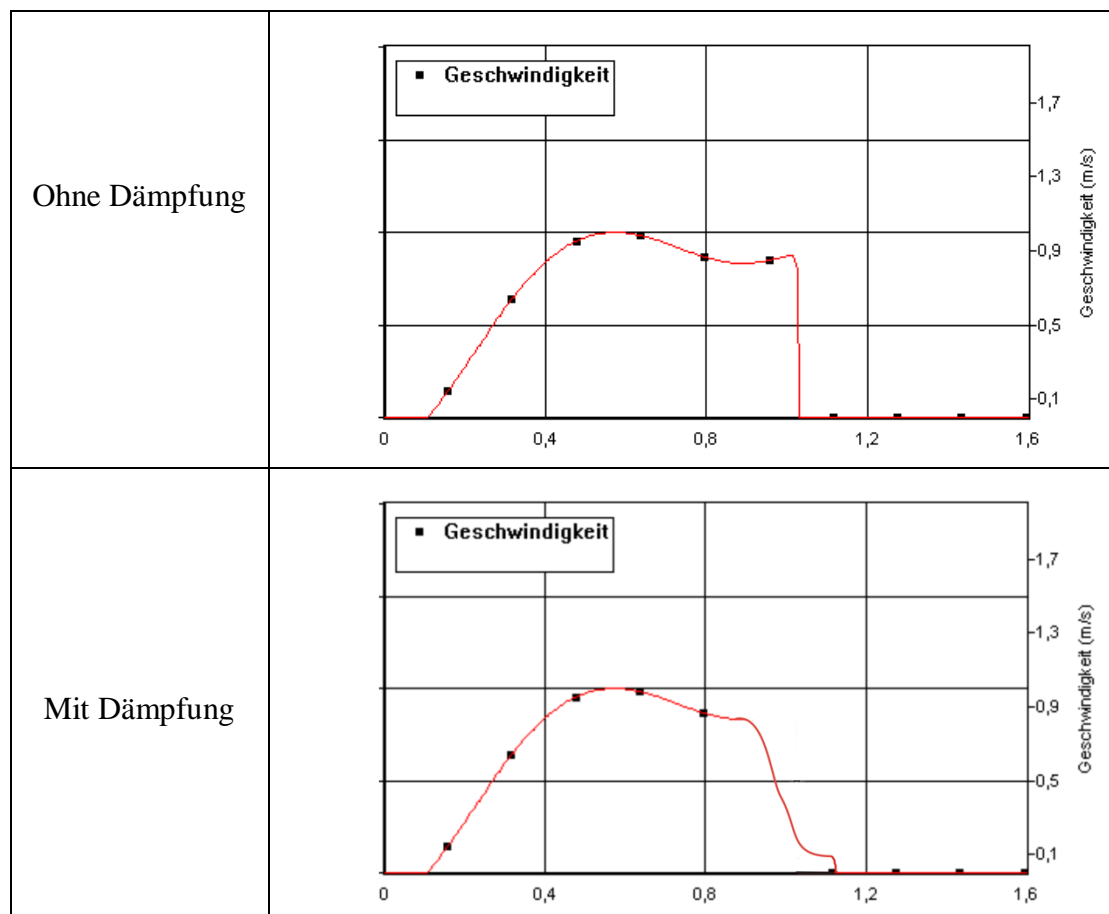


Abbildung 14: Vergleich Geschwindigkeitsverläufe /FEST/

Die Zielstellung bei der Umsetzung einer einfachen pneumatischen Lösung muss sein, vor der Einfahrt in die Endlage eine sehr geringe Geschwindigkeit zu erzielen. Es muss aber in Betracht gezogen werden, diese so zu gestalten, dass kein Stick-Slip Effekt auftritt bzw. der Kolben in Schwingung übergeht. Das Erreichen der Endlage muss in jedem Fall immer abgesichert sein und sollte ausreichend in der Dimensionierung berücksichtigt werden.

3.2 Varianten für eine günstige schnelle Zustellbewegung

Es ist nun zu prüfen, inwiefern eine Schaltung so gestaltet werden kann, dass sie den genannten Anforderungen gerecht wird. Das Ziel muss es sein mit möglichst hoher Geschwindigkeit anzufahren, aber zum richtigen Zeitpunkt auf ein sehr geringes Tempo abzubremsen und dann gedämpft gegen den Anschlag zu fahren. Eine erste Möglichkeit ist die Realsierung über 2 Drosseln in der Abluft. Wird über die Steuerung die Ausfahrt gestartet und die Zuleitung mit Druckluft versetzt, fährt der Kolben aus. Für die Diplomarbeit wurden ausschließlich Drossel-Rückschlagventile verwendet, was für den Eilgang aber nicht notwendig wäre. Über die 2 Drossel-Rückschlagventile in der Abluft kann die Luft entweichen. Je nach eingestelltem Durchfluss kann der Antrieb nun mit einer bestimmten Geschwindigkeit ausfahren. Beim Erreichen eines zu bestimmenden Vorabschaltwertes wird über ein Ventil eine der Drosseln weggeschaltet, sodass die Luft nur noch über die Zweite ausströmen kann. Bei der wegzuschaltenden Drossel muss nun ein hoher Durchfluss eingestellt sein, für die andere ein wesentlich geringerer Wert. Da die Luft nun sehr gedrosselt entweicht, wird der Kolben auf eine sehr niedrige Geschwindigkeit abgebremst. Es ist zu berücksichtigen, dass durch die Querschnittsverengung ein Gegendruck erzeugt wird, welcher nicht zu hoch werden darf, da sonst der Kolben vor der Endlage zum Stillstand kommen würde und somit die Zielstellung nicht erreicht wäre. Je nach Anwendungsfall ist zu Prüfen, ob ein Abschaltwert hinzugefügt werden sollte, um einen besseren Verlauf einfacher zu erlangen. Dafür müsste ein dritter Zweig in den Ablauf eingefügt werden, indem ein zusätzliches Ventil mit vorgeschalteter Drossel enthalten ist. Abbildung 15 zeigt noch einmal den funktionalen Pneumatik-Aufbau dieser Lösung. Alle Ventile befinden sich in Grundstellung. Die Abfolge dieser Lösung ist dem Funktionsdiagramm (Abbildung 16) zu entnehmen.

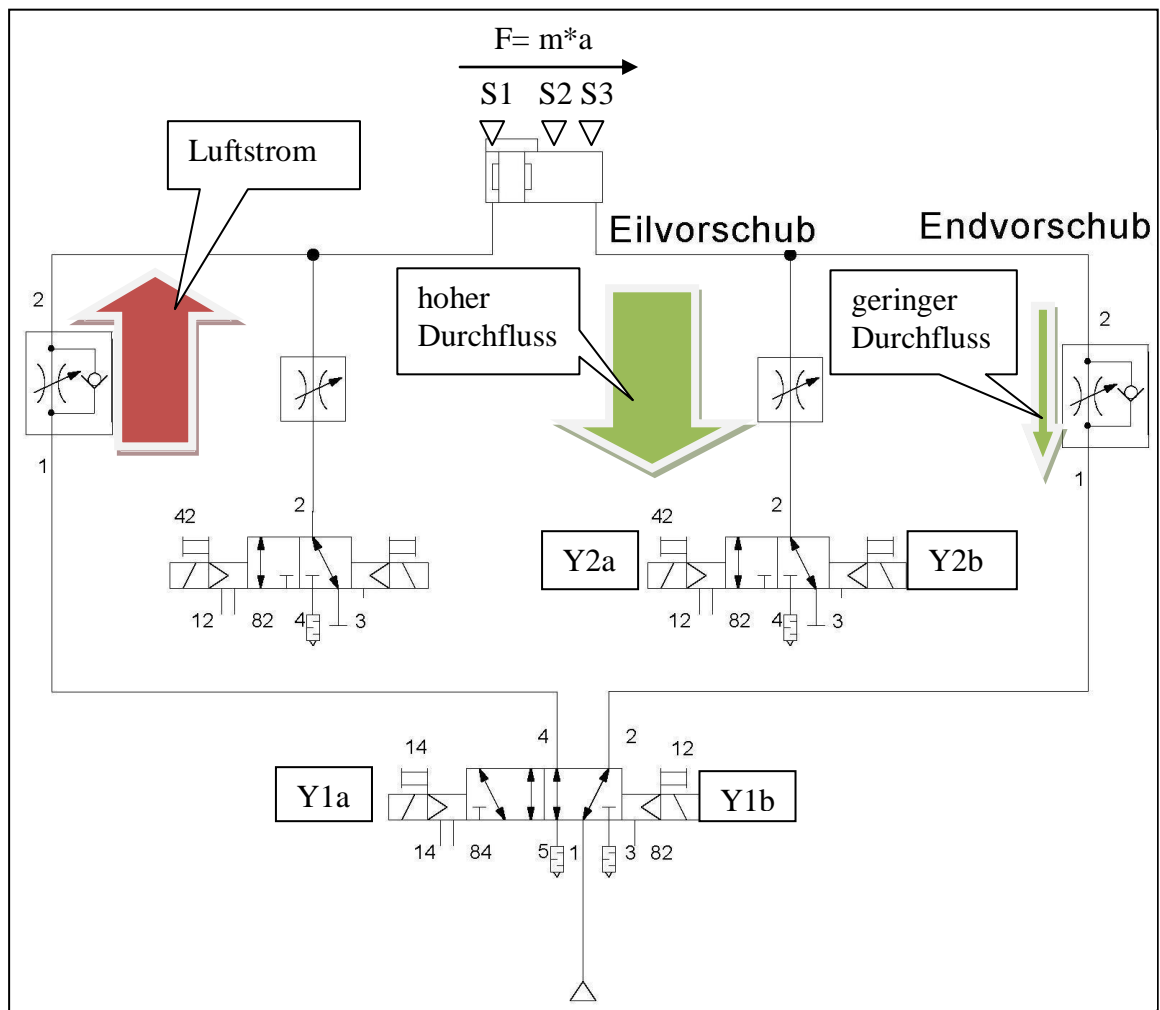


Abbildung 15: Aufbau Lösungsvariante 1

Lfd Nr.	Name	Zustand	0	1	2	3
1	Zylinder	Ende Anfang				
2	Hauptschalter	1 0				
3	Start	1 0				
4	Sensor S1	1 0				
5	Sensor S2	1 0				
6	Sensor S3	1 0				
7	Magnet Y1a	1 0				
8	Magnet Y1b	1 0				
9	Magnet Y2a	1 0				
10	Magnet Y2b	1 0				

Abbildung 16: Funktionsdiagramm Lösungsvariante 1

Eine nächste Möglichkeit (Abbildung 17), die in Betracht gezogen werden kann, ist eine Grundschialtung zu wählen und nach der Abluft ein Zusatzventil zu verbauen. Dieses Ventil ist an die Druckluftversorgung angeschlossen und kann bei kurzfristigem Schalten die Abluft stoppen und einen Gegendruck in der Abluftleitung erzeugen. Das bedeutet, in der Zylinderkammer des Antriebes entsteht ein Druckimpuls, welcher den Kolben bremsen wird. Auch in diesem Fall müsste ein Näherungssensor angebracht werden, der den Zeitpunkt des Druckimpulses bestimmt. Das Problem bei dieser Lösung ist das Handling, da der Gegendruck einmal nicht zu früh und auf der anderen Seite nicht zu lang sein darf, da sonst der Kolben zum Stillstand kommen wird und somit die Aufgabenstellung nicht erfüllt wäre. Da in größeren Anlagen mehrere Verbraucher gleichzeitig aktiv sind, wäre zu prüfen, inwiefern dieser Unsicherheitsfaktor einbezogen werden kann, und ob eine Einstellung überhaupt möglich wäre. Die Abfolge dieser Lösung ist dem Funktionsdiagramm (Abbildung 18) zu entnehmen.

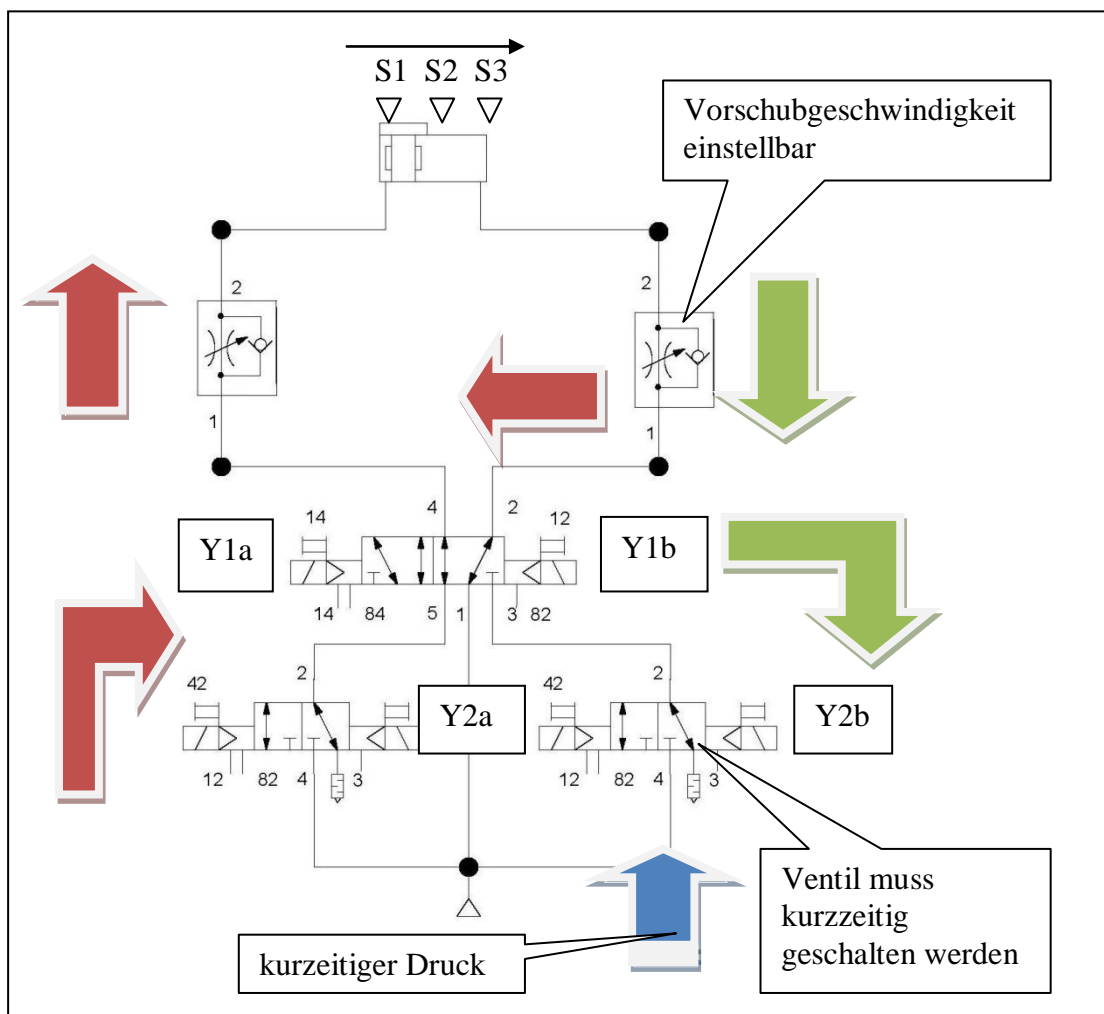


Abbildung 17: Aufbau Lösungsvariante 2

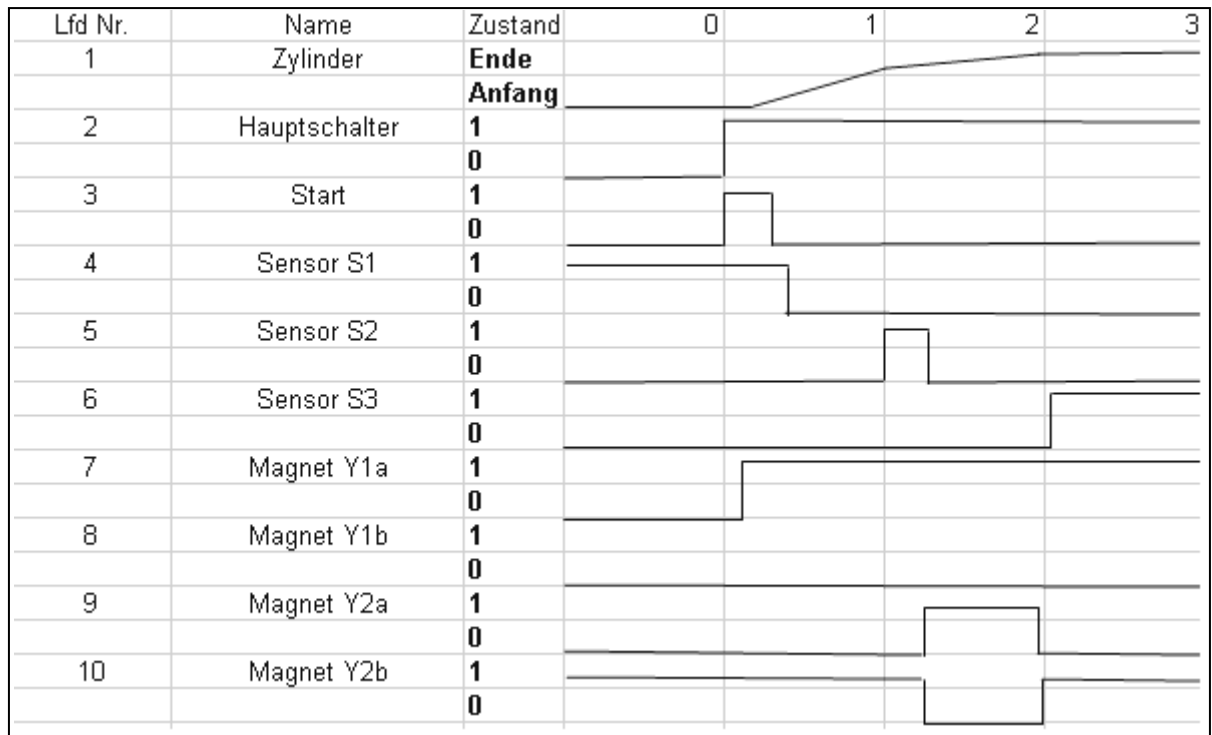


Abbildung 18: Funktionsdiagramm Lösungsvariante 2

Eine letzte Variante, die betrachtet werden muss, ist die Möglichkeit in der Kammer des Kolbens, wo die Luft entweicht, ein Luftpolster zu erzeugen. Dieses soll so realisiert werden, dass vor Einfahrt in die Endlage keine Luft abfließen kann und somit der Druck in der Abluftkammer relativ schnell ansteigt und der Kolben gebremst wird. Man würde in diesem Fall eine einfache Pneumatik-Grundschialtung verwenden und ein Ventil nach dem Drossel-Rückschlagventil einbinden (Abbildung 19). Das Problem dieser Lösung sind die vielen Abhängigkeiten von der Luft, da sich Einflussfaktoren wie die Temperatur stark auf die Kompressibilität auswirken. Am besten verdeutlicht dies die allgemeine Gasgleichung:

$$p \times V = n \times R_m \times T$$

p = Druck (in bar)

V = Volumen (in dm^3)

T = absoluter Temperatur (in Kelvin)

n = Stoffmenge (in Mol)

R_m = Regnaultsche Zahl

Das bedeutet eine vernünftige Einstellung für die Praxis wäre schwer möglich und die Gefahr, dass der Kolben nicht die Endlage erreicht, wäre relativ hoch. Das Funktionsdiagramm ist analog Lösungsvariante 2.

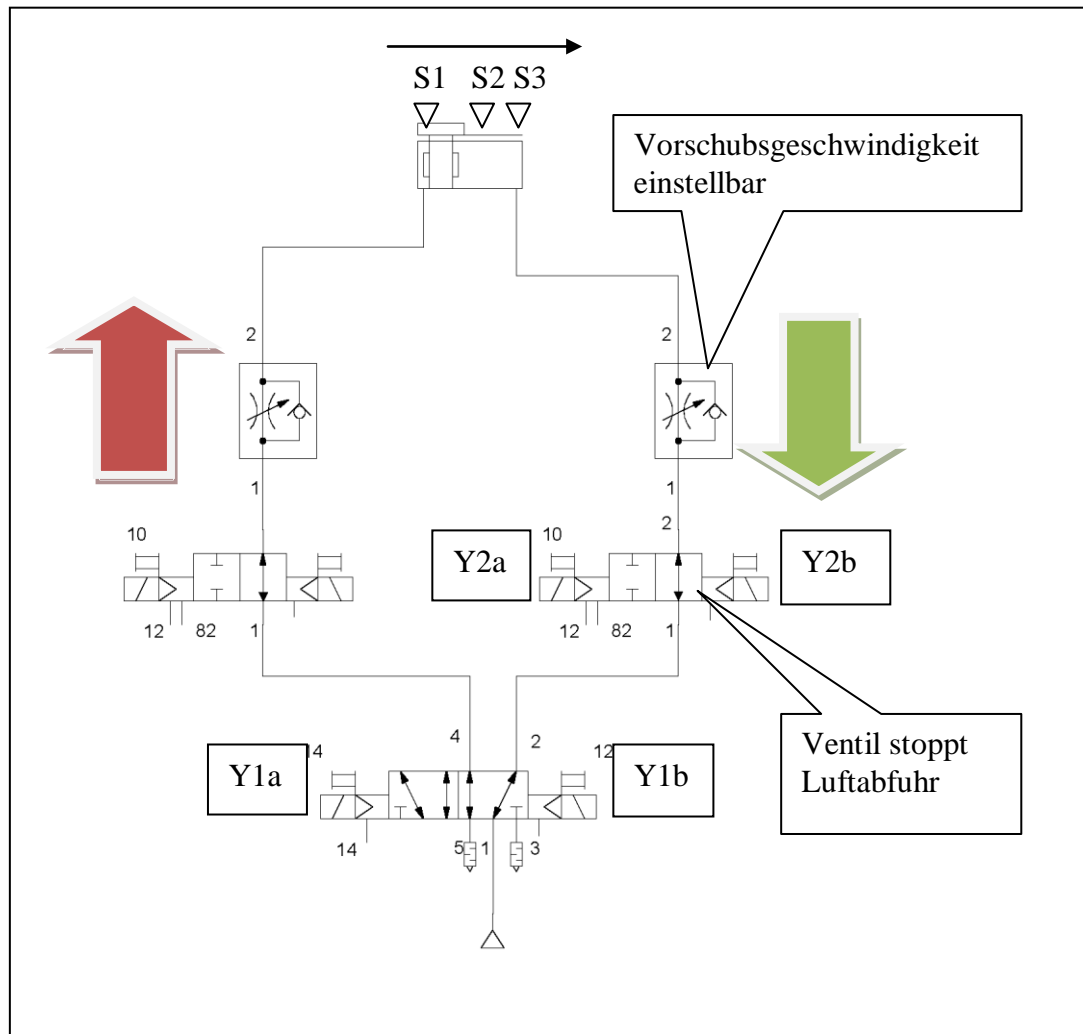


Abbildung 19: Aufbau Lösungsvariante 3

Für die Diplomarbeit wird der erste Lösungsansatz verwendet, da die Grundvoraussetzungen gut reguliert werden können. Zudem sind die weiteren Lösungsvarianten schwer einstellbar, so dass ein Einsatz in einer realen Anlage nicht geeignet wäre. Für das weitere Vorgehen wird nun ein Versuchsplan erstellt. Als Erstes werden alle notwendigen Anfangswerte bestimmt. Diese sind notwendig, um in einem späteren Simulationsmodell konkrete Werte benutzen zu können. Es wird die Reibkraft ermittelt, welche aufgebracht werden muss, damit der Antrieb in Bewegung übergeht. Für die Drossel-Rückschlagventile ist zu ermitteln, wie das Verhältnis von steigenden Umdrehungen an der Regulierschraube und dem Durchfluss in Drosselrichtung ist. Außerdem ist der Durchflusswert an der Drossel für das geringste Tempo des Linearantriebes zu bestimmen, bei welchem der Stick-Slip Effekt noch nicht auftritt. In der ersten Messreihe soll die variierende Größe die bewegte Masse sein. In 7 Schritten wird diese erhöht, dabei soll die Gesamtverfahrzeit unterhalb einer Sekunde bleiben.

Die Anfahrgeschwindigkeit sowie die geminderte Geschwindigkeit sollen konstant bleiben. Der Abschaltpunkt muss in Abhängigkeit der Masse verändert werden. Dieser Versuch wird zum Verständnis der Anlage dienen und einen Überblick über realisierbare Werte geben. Im nächsten Schritt werden in Abhängigkeit der zu erreichenden Positionierzeit, welche in einem zweckmäßigen Intervall vorgeben ist, die zu transportierende Masse, die zwei Drossel-Rückschlagventile sowie der Abschaltpunkt verändert.

3.3 Aufbau eines realen Versuchsmodells

3.3.1 Vorbereitung des Versuches

Zu Beginn mussten die Bauteile nach den Kriterien Verbrauch sowie Schaltzeit ausgewählt werden. Diese Faktoren sind von dem zuvor ausgewählten Linearantrieb sowie der festgelegten Zielgeschwindigkeiten abhängig. Der Verbrauch wurde für 60 Takte und einen Praxisfaktor von 1,3 mit 550 l/min errechnet. Der Linearantrieb fährt mit Eilvorschub bis zu einem Abschaltpunkt aus, bei welchem er nur noch mit einer sehr geringen Geschwindigkeit die Endlage erreicht. Damit dieser Umschaltwert festgelegt werden kann, ist ein berührungsloser magnetischer Näherungsschalter mit einem bestimmten Weg vor der Endlage zu integrieren. Für diesen wurden Sensoren gewählt, welche in der Nut des Linearantriebs angebracht werden können. Der Wert des Weges vor der Endlage wurde über Experimente am Versuchsstand und über Modellbildung am Rechner ermittelt. Fährt der Kolben mit einer niedrigen Geschwindigkeit am Ende ein, sind die kinetische Energie, sowie der Ruck gering.

Für die Regulierung der Geschwindigkeit wurden Drossel-Rückschlagventile mit Regulierschraube und einem Normalnennendurchfluss in Drosselrichtung von 420 l/min ausgewählt und im Abluftzweig integriert. Es musste experimentell geprüft werden, in welcher Abhängigkeit die Regulierung und der Durchfluss stehen, um ein schnelles Einstellen des gewünschten Wertes zu ermöglichen, wenn man z.B. über Modellbildung Werte ermitteln möchte. Dafür wurde mit einem Durchflussmesser der Firma Festo AG & Co. KG für die im Experiment eingesetzten Ventile die Kennlinie ermittelt. Abbildung 20 zeigt das ermittelte Diagramm.

Das Ziel ist es, für verschiedene Zustellzeiten die Drosselstellung und den somit eingestellten Durchfluss zu erfassen. Die Drosselöffnung wurde um 0,5 Umdrehungen an der Regulierschraube inkremental erhöht und der Durchfluss erfasst.

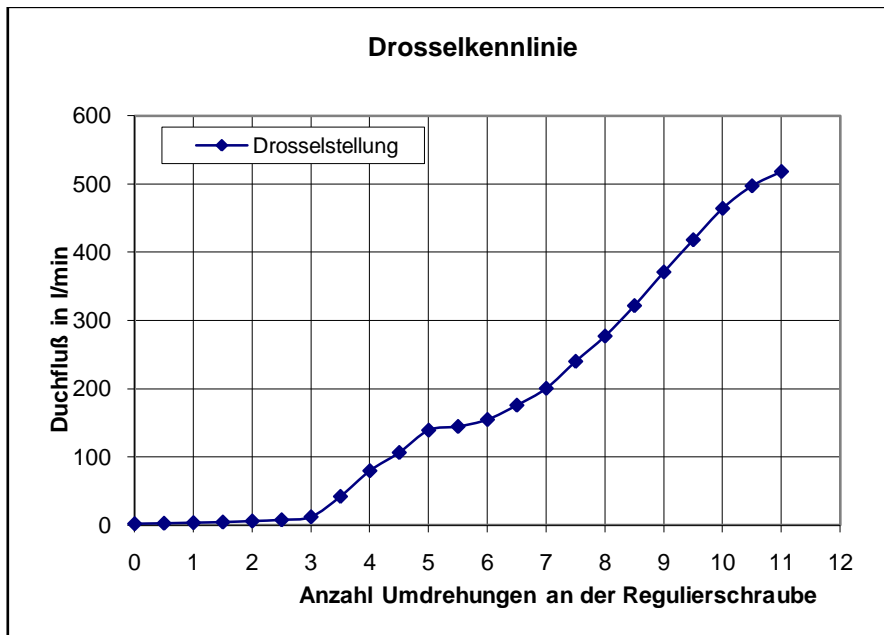


Abbildung 20: Drosselkennlinie

Beim Verfahren des Antriebes mit Eilvorschub soll nun ein Bremsvorgang auf eine sehr niedrige Geschwindigkeit realisiert werden. Für diesen Vorgang benötigt man sehr kurze Schaltzeiten der Ventile, da diese das Umschalten realisieren. Hierfür wurden Schnellschaltventile mit Steuerluft verwendet, da diese nur eine Schaltverzögerung von 13 ms haben. Bei diesen Ventilen wird der Kolbenschieber nicht elektrisch, sondern über einen elektrisch gesteuerten Eingang, durch welchen die Steuerluft strömt, geschaltet. Die verwendeten Ventile sind alle reversibel, um den festgelegten Ablauf zu realisieren. Um die Qualität der Ruckbegrenzung zu beurteilen, wurde über eine Analogkarte das Signal eines Wegmesssystems, welches parallel zum Linearantrieb angeschlossen ist, eingelesen. Einerseits ist es möglich, den Weg über der Zeit und auf andererseits über Differenzierung des Wegsignals den Geschwindigkeitsverlauf darzustellen. Die Signalverarbeitung und Darstellung wurde über einen PC und das Messdatenerfassungsprogramm „Labview“ realisiert. Für die Experimente wurde nun eine Messreihe durchgeführt, bei der inkremental die zu bewegende Masse erhöht wird. Für diesen Versuch wurden aus der firmeninternen Fertigung Gewichte von 1,6 kg und 4,5 kg mit einem metrischen Gewinde zur Verfügung gestellt, welche über eine Halterung am Linearantrieb befestigt werden können.

Es ist zu beachten, dass die Halterung sowie die Eigenmasse des bewegten Kolbens am Versuchsstand mit betrachtet werden muss. Für den Versuchsaufbau bedeutet das ein Grundgewicht von 1,6 kg. In der SITEC werden häufig pneumatische Greifer verwendet, welche das Bauteilhandling übernehmen. Je nach Größe haben diese ein Gewicht bis zu 5 kg. Hinzu kommt ein maximales Gewicht von 3 kg, bedingt durch die möglichen Halterungen für die Greifer. Das heißt zusammenfassend mit dem beförderten Bauteil eine maximal zu transportierende Masse von 15 kg. Es ergibt sich somit die folgende Staffelung (Tabelle 8) aus den vorhandenen Massen:

Masse in kg	1,6	3,2	6,1	7,7	10,6	12,2	16,7
-------------	-----	-----	-----	-----	------	------	------

Tabelle 8: Staffelung Massen

Abbildung 21 zeigt den realisierten Demonstrator für eine pneumatische Zustellbewegung.

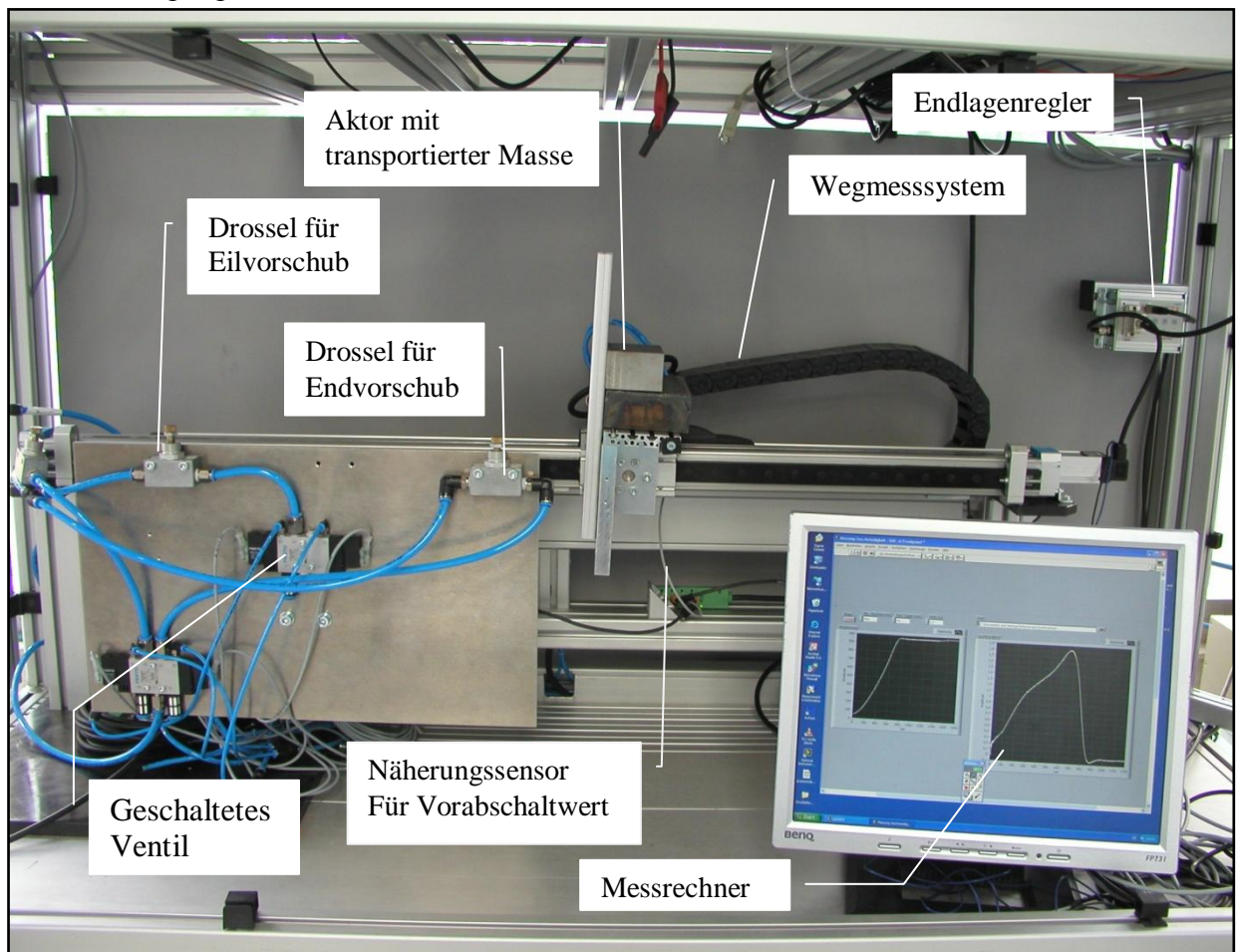


Abbildung 21: Versuchsstand

Die Zielsetzung des ersten Versuches war, mit zunehmender Masse die maximale Anfahrgeschwindigkeit zu erreichen. Es hat sich dabei herausgestellt, dass für den Eilvorschub keine Drosselung notwendig ist, da diese bei maximaler Öffnung immer noch einen pneumatischen Widerstand darstellt. Für alle weiteren Experimente wurde eine Drosselung für die Einstellung des Eilvorschubs genutzt. Dabei erfolgte die Veränderung bis die vorgegebene Positionierzeit (Tabelle 9) erreicht wurde. In der Diplomarbeit bezieht sich die Positionierzeit auf die Zeit, welche benötigt wird, um ein Ausfahren zu realisieren. Da in der SITEC für die Zustellung von Bauteilen eine Zeit bis zu 2 s vorgesehen ist, wurden die Versuche auch in diesem Intervall durchgeführt.

Die minimale Verfahrzeit ergab sich aus den ersten Versuchen über die maximal erreichbaren Geschwindigkeiten, somit ergibt sich aus folgender Tabelle 9, die Aufteilung.

Positionierzeit in s	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
----------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabelle 9: Staffelung Positionierzeit

Bei dem Versuchsaufbau wurde der bei SITEC anlagenübliche Systemdruck von 6 bar eingestellt. Weiterhin ist bei der Verbindung der Bauteile zu beachten, dass möglichst wenig pneumatische Widerstände verwendet werden z.B. der Einsatz von T-Verzweigungen, da sonst die Endergebnisse wesentlich beeinflusst wurden. Die Geschwindigkeit für den Eilvorschub würde sinken und spätere Betrachtungen in einer Simulation würden sich als sehr schwierig erweisen.

3.3.2 Präsentation der Messergebnisse

Bevor die ersten Versuche gestartet werden konnten, wurde ermittelt, bei welchem Durchfluss der Linearantrieb in Stick-Slip übergeht (Abbildung 22). Für den Versuchsaufbau und das verwendete Drossel-Rückschlagventil wurde der Effekt bei 12,3 l/min erzielt. Das heißt, bei drei Umdrehungen an der Regulierschraube, ausgehend von einer geschlossenen Drossel, hat der Kolben eine sehr niedrige Geschwindigkeit, mit welcher er immer die Endlage erreicht. Diese Einstellung wurde bei allen Massen und Zustellzeiten genutzt, da somit eine sichere Einfahrt in die Endlage garantiert ist.

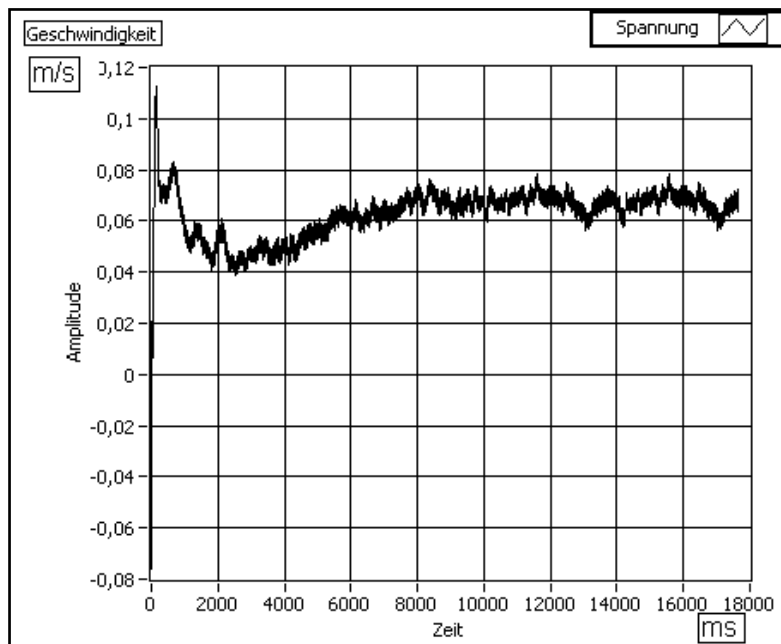


Abbildung 22: Geschwindigkeitsverlauf bei 3 Umdrehungen

Im ersten Versuch wurde die maximal mögliche Geschwindigkeit für die Zustellbewegung ermittelt (Tabelle 10), wobei im Eilvorschub keine Drosselung verwendet wurde, was jedoch bei allen weiteren Experimenten erfolgte.

Masse in kg	1,6	3,2	6,1	7,7	10,6	16,7
Pos.zeit in s	0,75	0,8	0,8	0,85	0,85	0,95
max. v in m/s	2,2	2,1	2,1	2,05	2,05	1,9

Tabelle 10: Ermittlung der kürzesten Positionierzeit

Diese Werte sollen im weiteren Verlauf als Vergleich mit dem Servobetrieb dienen. Wurde für den Eilvorschub ein Drosselrückschlagventil verwendet, stieg bei maximaler Öffnung die Positionierzeit um 0,1 s. Das bedeutete für den nächsten Versuch, dass die niedrigste Positionierzeit bei 0,9s liegt. Die nächste Versuchsreihe sollte nun die Einstellbarkeit der Anlage in Bezug auf die zugestellte Masse und die Zustellzeit ermöglichen.

Als Ergebnis zeigte sich, dass keine Darstellung über eine Formel, zwischen dem eingestellten Wert an der Drossel für Eilvorschub, dem Abschaltwert und der Zustellmasse möglich war.

Das bedeutet, dass für eine Einstellung teilweise eine Kurvenschar notwendig ist, aus welcher nun ein Wert gewählt werden kann. Desweiteren wird der Massebereich geteilt. Es wird ein Normbereich bis 10 kg und ein Bereich für größere Massen bis 17 kg festgelegt. Für den jeweiligen Bereich ist eine Stellung an der Regulierschraube der Eilgangdrossel in Abhängigkeit der Positionierzeit aus einer Kurve abzulesen (Abbildung 23).

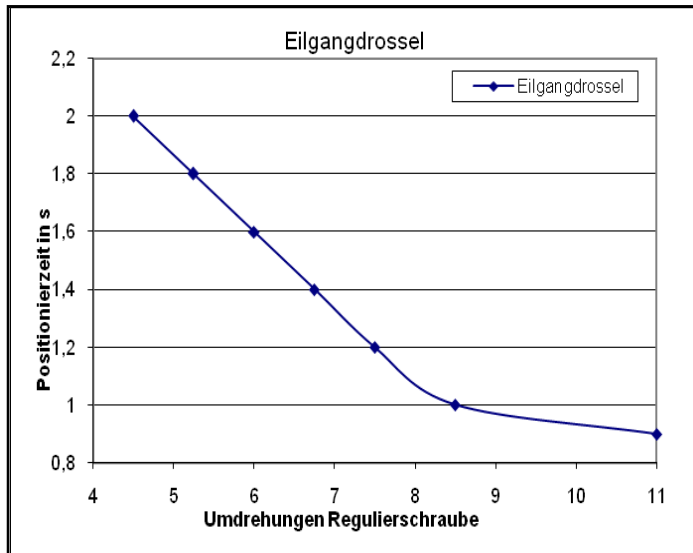


Abbildung 23: Einstellung Drossel für Massen bis 10 kg

Bei größeren Massen ist mit dieser Einstellung die vorgegebene Zustellzeit nicht erreichbar. Desweiteren wird bei hohen Massen eine Verfahrzeit ab 1,4 s empfohlen, da bei dieser und einer hohen Verfahrsgeschwindigkeiten Schwingungen in der Endlage entstanden sind. Somit war die Zielstellung verfehlt und es musste ein geringerer Eilvorschub gewählt werden. Aus Abbildung 24 ist das Verhältnis von Positionierzeit und Umdrehungen an der Regulierschraube für Massen ab 10 kg zu entnehmen.

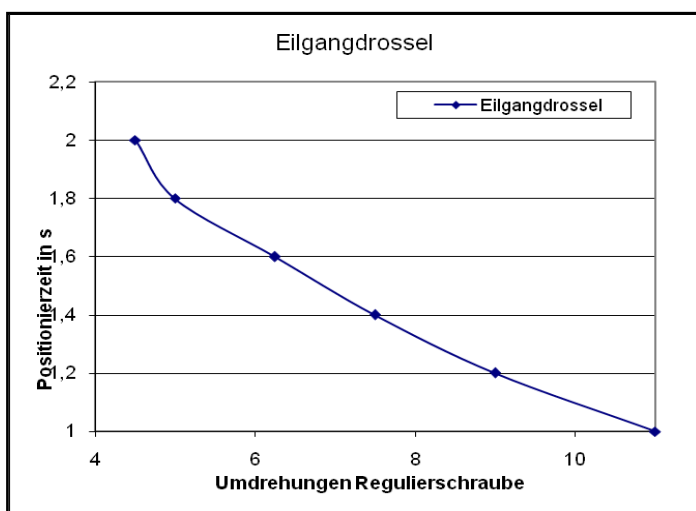


Abbildung 24: Einstellung Drossel für Massen ab 10 kg

Im folgenden Diagramm ist für den jeweiligen Massebereich und die geforderte Zustellzeit der Abschaltwert abzulesen. Dieser Wert gibt an, wie weit der Näherungssensor vor der Endlage anzubringen ist, damit eine gut gedämpfte Einfahrt möglich ist.

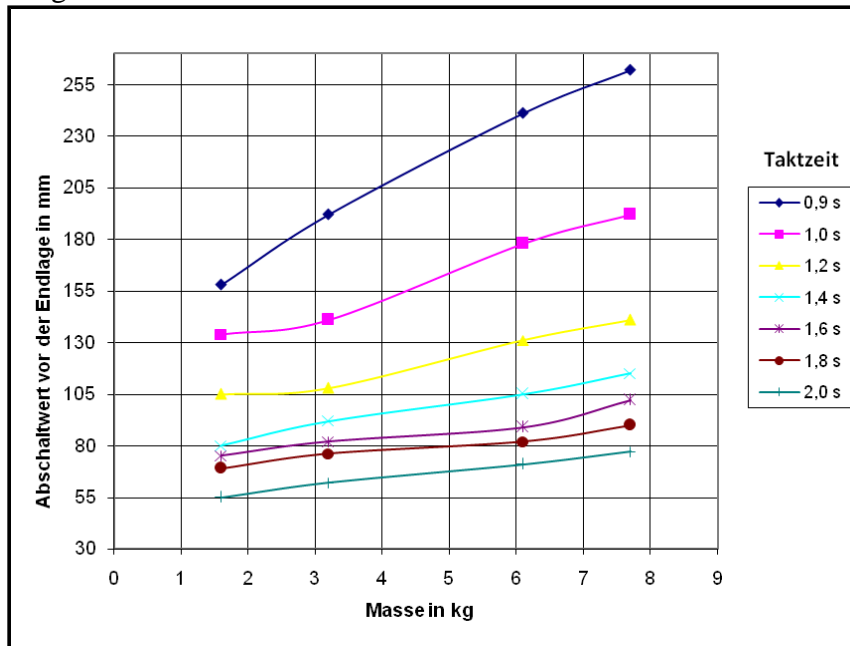


Abbildung 25: Vorabschaltwerte für Massen bis 10 kg

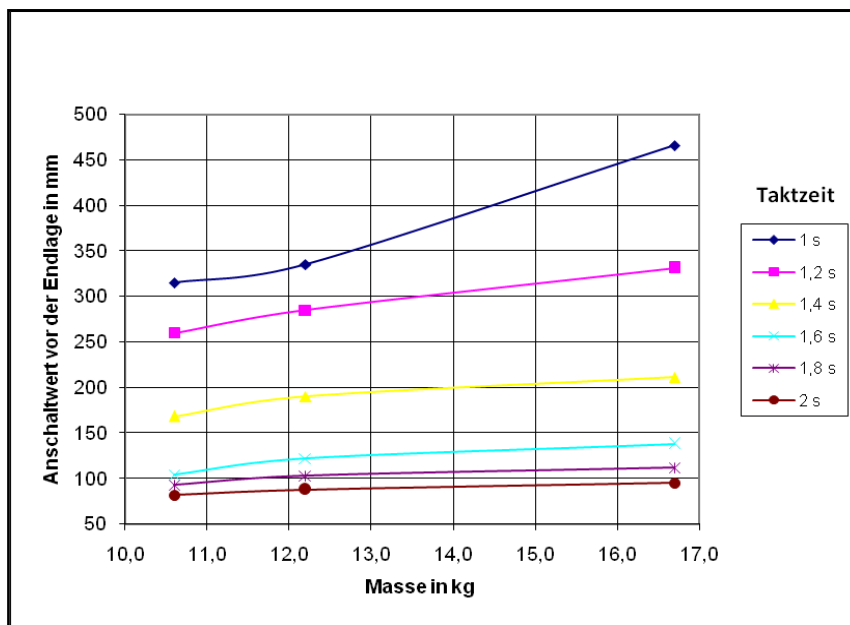


Abbildung 26: Vorabschaltwerte für Massen ab 10 kg

3.3.3 Vergleich mit dem Servobetrieb

Um die Qualität der einfachen Pneumatiklogik beurteilen zu können, werden nun die Geschwindigkeitsverläufe für ein Gewicht von 7,7 kg mit dem Servobetrieb verglichen. Bei der preiswerten Lösung wurde das Diagramm aus der ersten Versuchsreihe verwendet. Den Diagrammvergleich zeigt Abbildung 27.

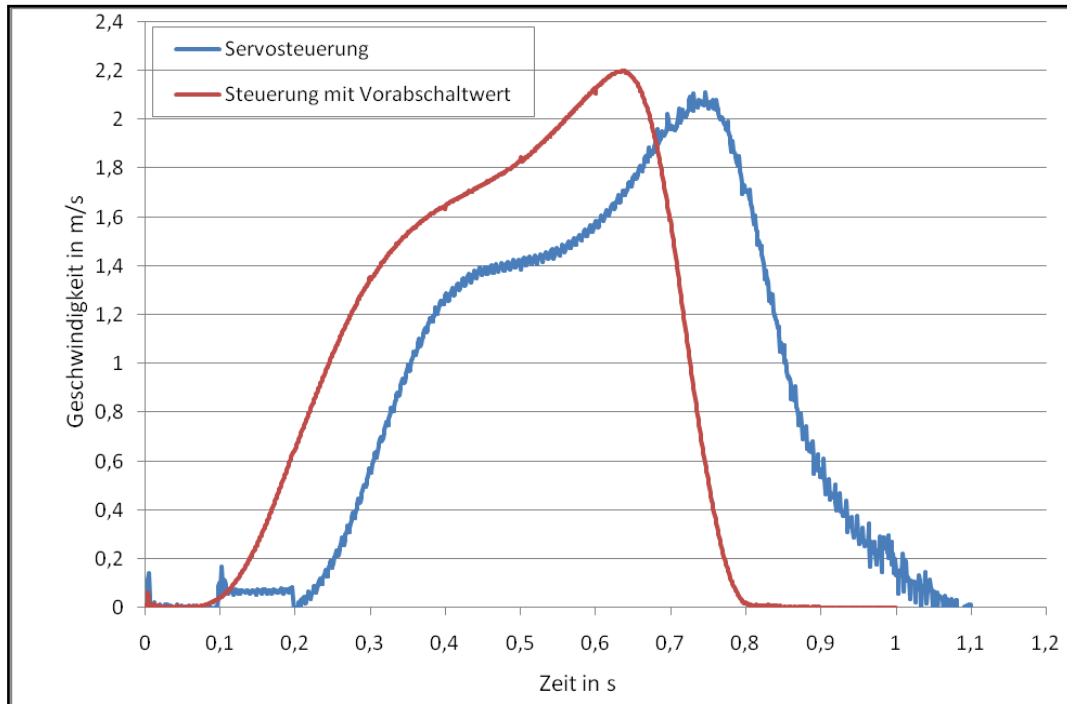


Abbildung 27: Vergleich Geschwindigkeitskurven bei 7,7 kg

In beiden Verfahren ist zu erkennen, dass mit einer hohen Beschleunigung angefahren wird. Die Geschwindigkeit ist bei der preisgünstigen Lösung um 0,1 m/s höher im Vergleich zum Servoantrieb. Auch die Anfahrt ist schneller und die Gesamtverfahrenzeit kürzer, das bedeutet die einfache Lösung kann in Betrachtung der Zustellzeit ein gleichwertiges Ergebnis liefern. Die Einfahrt in die Endlage erfolgt in beiden Fällen mit einer sehr geringen Geschwindigkeit und somit mit einem sehr geringen Ruck. Dabei ist der Geschwindigkeitsverlauf beim Servoantrieb besser und bei zunehmenden Massen konstant. Die Unstetigkeit im Verlauf beider Möglichkeiten erklärt sich durch ein kurzzeitiges Verklemmen des Aktors. Bei der Einfahrt in die Endlage ist beim Servoantrieb ein Rauschen des Verlaufes zu erkennen, dieser ist durch das genaue Positionieren des Kolbens durch den Regler zu begründen, was eine gute Dämpfung zur Folge hat. Beim Vergleich mit größeren Massen ergibt sich ein ähnliches Bild, wie beim obigen Beispiel.

Der Servoantrieb kann jedoch bei größeren Massen eine deutlich höhere Geschwindigkeit erreichen. Hintergrund ist, dass die pneumatischen Widerstände, welche bei der einfachen Lösung höher sind und sich stärker auswirken, den Durchfluss und somit die Geschwindigkeit verringern. Zudem ist das Handling mit Servobetrieb bei größeren Massen und hohen Geschwindigkeiten einfacher, da sich mit dem Verfahren des Vorabschaltwertes der Linearantrieb schwierig abbremsen lässt und die Gefahr von Schwingungen in der Endlage hoch ist. Diese Schwingungen entstehen, da die komprimierte Luft wie eine Feder wirkt. Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die in der Diplomarbeit herausgestellte Lösung gegenüber der preisintensiven Servoachse gleichwertig gute Werte in Positionierzeit und Endlagendämpfung erzielt. Besonders bei kleineren Massen und optimaler Verbindung der Bauteile lassen sich in Sonderfällen bessere Werte erlangen. Beim Anstieg der zu transportierenden Massen und hohen Anforderungen an Dämpfung und Zustellzeit ist das Handling sowie das Endergebnis beim Betrieb mit der Servoachse besser. Bei der Auswahl einer pneumatischen Zustellbewegung muss die genau zu erfüllende Funktion bekannt sein, um zwischen den zwei Varianten eine Entscheidung treffen zu können.

3.4 Aufbau Simulationsmodell für eine Einstellregel

Mit Hilfe der experimentell ermittelten Werte lässt sich nun eine Einstellung realisieren, die bei Instandsetzungsmaßnahmen Unterstützung geben kann. Dafür ist ein geeignetes Rechenmittel auszuwählen. Ein wichtiger Faktor ist dabei, dem Nutzer dieser Hilfe nicht nur Werte zu übermitteln, sondern ihm relativ schnell und einfach die Besonderheit der ihm vorliegenden Anlage zu erläutern. Aus diesem Verständnis heraus werden nur die Parameter verwendet, welche direkt vorgegeben sind, z.B. die Positionierzeit, oder welche abgeschätzt bzw. gemessen werden müssen, z.B. die zu transportierende Masse. Die Einstellhilfe wird für die Diplomarbeit als Makrodarstellung über das MS Office Paket mittels Excel erstellt (Abbildung 28).

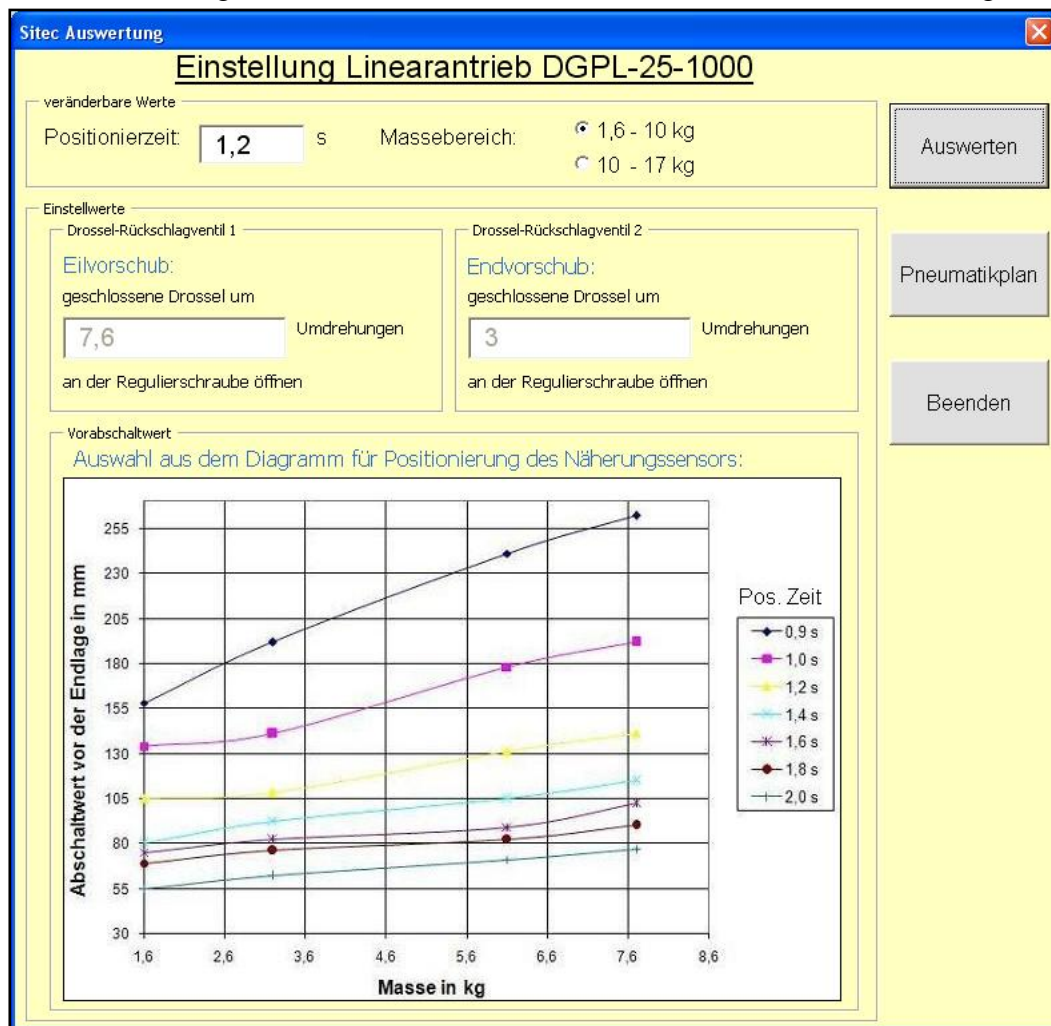


Abbildung 28: Einstellhilfe für Service-Techniker

Der Vorteil dieser Realisierung ist, dass dieses Programm grundsätzlich auf den häufigsten Rechnern vorhanden und keine zusätzlich Installation notwendig ist.

Eine weitere Möglichkeit könnte die Darstellung über einen Online Service sein, was wiederum erfordert, dass der Service-Techniker über eine Netzanbindung verfügt. Als Darstellungsbeispiel soll aber vorerst ein VBA Programm dienen. Beim Öffnen des Programms wird das Makro direkt gestartet und über eine Useroberfläche sind nun erste Berechnungen möglich. Bevor diese gestartet werden kann, muss eine Positionierzeit des Werkstücks sowie ein Massebereich gewählt werden. Über eine Auswertetaste wird nun dem Nutzer die Einstellung für die 2 Drossel-Rückschlagventile angezeigt, dass heißt einerseits für Eilvorschub und andererseits für Endvorschub. Wird die genaue Position der Drosseln im Pneumatikplan benötigt, ist es möglich, über eine separate Taste diesen in einem zusätzlichen Fenster aufzurufen. Für diese Ergebnisse konnte ein Zusammenhang gefunden werden, welcher im Hintergrund des Tools, den Wert für die Drosseln anhand der Zustellzeit bestimmt. Für die Einstellung des Vorabschaltwertes wird in Abhängigkeit des ausgewählten Massebereiches dem Bediener ein Diagramm angezeigt, in welchem er anhand seiner Positionierzeit und seiner zuzustellenden Masse den Vorabschaltwert auswählen kann. Das hat den Vorteil, dass bei Zustellzeiten, für welche kein Wert bestimmt wurde, der Nutzer zwischen zwei gemessenen Kurven den Wert abschätzen kann. Für die Diplomarbeit wurde das Tool als Beispiel für den Versuchsaufbau umgesetzt. Es wäre nun denkbar für andere häufig verwendete Linearantriebe auf ähnliche Weise eine Einstellhilfe zu realisieren. Über eine Vorauswahl müssten die wichtigsten Parameter, Hub und Kolbendurchmesser gewählt werden, um danach in ein Menü zu gelangen, welches analoge Möglichkeiten, wie das umgesetzte Tool, bietet.

3.5 Betrachtung einer Näherungsrechnung

Eine weitere Möglichkeit, Werte zu bestimmen bzw. simulieren zu können, wäre über eine Formel z.B. ein Kräfteverhältnis, einen Richtwert zu erhalten. Über ein Programm, was die Kombination von Berechnungs-Bausteinen zulässt oder eine Grundformel, welche im Hintergrund eines Tools integriert ist, könnte man schnell Einstellparameter bestimmen. Die Problematik hierbei ist, zu Beginn abschätzen zu müssen, welche Abhängigkeiten betrachtet werden und welche nicht. Das heißt, für das Beispiel der Diplomarbeit, bevor überhaupt ein Abschaltwert ermittelt werden kann müssten Abhängigkeiten, wie Drücke in den Zylinderkammern, berechnet werden.

Hinzu kommt die Schwierigkeit, diese Berechnung mit einer Logik zu koppeln, um einen Vorabschaltwert zu simulieren.

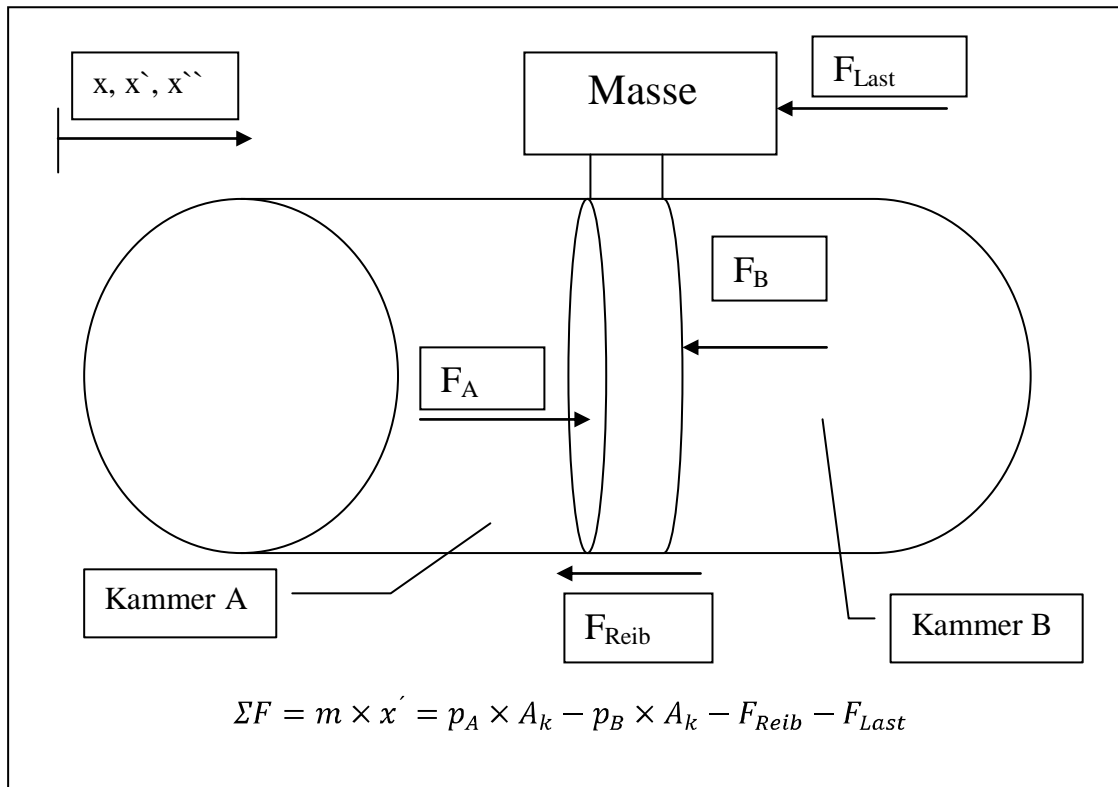


Abbildung 29: Kräftegleichgewicht

Abbildung 29 zeigt das Kräftegleichgewicht für den Linearantrieb. Aus diesem Schema wird das erste Berechnungsproblem ersichtlich. Da der Druck in der Kammer B beim Ausfahren nicht genau dem atmosphärischen Druck entspricht, bedingt durch die Ventile und Drosseln, entsteht dort der erste Unsicherheitsfaktor. Für die Berechnung des Gegendruckes, welcher durch die Regulierung des Druckes hervorgerufen wird, wäre die Drosselfläche notwendig, welche vom Hersteller aber nicht gegeben ist und somit eine weitere Berechnungsgrundlage fehlt ($Q = \alpha \times A_D \times \sqrt{2 \times \frac{\Delta p}{\rho}}$). Das heißt, die Druckverhältnisse müssten geschätzt werden. Eine weitere Unsicherheit entsteht durch Vernachlässigung von weiteren pneumatischen Widerständen und Ventilen. Das wiederum bedeutet, dass die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen keine realen Werte erreichen werden. So kann auf diese Weise kein guter Abschaltwert bestimmt werden, da dieser in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ist. Für die Diplomarbeit wird diese Variante der Simulation nicht weiter betrachtet, da schon in Vorbetrachtungen so hohe Unsicherheiten enthalten sind, dass ein praktischer Nutzen ausgeschlossen werden kann.

3.6 Entwurf eines Simulationsmodells

3.6.1 Auswahl eines Programms

Nachdem nun experimentell die Abhängigkeiten des realisierten Versuchsstands praktisch ermittelt wurden, soll geprüft werden, ob mit Modellbildung von Pneumatik Werte voraussagbar sind. Bevor ein Simulationsmodell aufgebaut werden kann, muss ein geeignetes Programm ausgewählt werden, was Unterstützung gibt. Hierfür wurden folgende 3 Programme in Betracht gezogen: Firma Mathworks-Matlab/Simulink, von der Firma Festo AG & Co. KG-Fluid Sim und von der ITI GmbH-SimulationX. Anhand von vorhanden Demo-Versionen oder Lizenzen der Hochschule Mittweida wurde eine Vorauswahl getroffen. Das Programm Matlab/Simulink bietet die Möglichkeit dynamische Modelle grafisch zu generieren. Über den Programmteil Matlab lassen sich verschieden mathematische Operationen durchführen, welche das Modell unterstützen können. Zudem sind über eine Bibliothek fertige Funktionsbausteine für unterschiedliche Fachgebiete vorhanden. Diese Bibliothek kann vom Nutzer über eigene erstellte Blöcke erweitert werden. Ein Nachteil für die Problemstellung der Diplomarbeit war, dass keine Grundblöcke für Pneumatik vorhanden sind. Nach Recherchen für die Möglichkeit, über eigene Bausteine ein Modell zu erstellen, wurde diese Eventualität ausgeschlossen, da im Fall der Diplomarbeit nicht nur Durchflüsse oder Drücke simuliert werden sollen, sondern auch eine Schaltungslogik erforderlich ist. Zudem wäre der Zeitaufwand für den kompletten Aufbau einer Pneumatik Bibliothek zu hoch. Eine weitere Chance bietet die Firma Festo. Deren Tool bietet die Möglichkeit, über eine grafische Oberfläche eine Schaltungslogik in Form eines Relaisplans, mit einer Pneumatikschaltung zu verbinden. Der Vorteil hier ist einmal, dass die Bauteile, welche am Versuchstand verwendet wurden, aus einer Bibliothek eingefügt werden können. Der Nachteil an diesem Programm für die Diplomarbeit war, dass die Verläufe nur rein schematisch sind. Da die Zustellbewegung mit hohen Geschwindigkeiten verfährt und die Bewertung der Endlagendämpfung wichtig ist, sind ungenaue Verläufe von Weg und Geschwindigkeit ungünstig. Für eine reine Simulation einer Schaltungslogik ist das Programm geeignet, für die Diplomarbeit aber nicht. Die Ermittlung des Abschaltwertes ist mit diesem Tool zu ungenau. Eine weitere Option bot die ITI GmbH mit dem Tool SimulationX an. Auch bei diesem Programm kann über eine grafische Oberfläche und eine Schaltungslogik ein Modell generiert werden.

Über eine Bibliothek sind die wichtigsten Pneumatikbauteile als Block auswählbar. Zusätzlich bietet dieses Programm die Möglichkeit Durchflüsse und Druckverläufe zu analysieren. Auch die Erweiterung durch Integration pneumatischer Widerstände oder Tests verschiedener Schaltungsmöglichkeiten ist möglich. Anhand einer Demoversion wurde dieses Programm in Relation zu den anderen Möglichkeiten, als das geeignetste Tool für die Problemstellung der Diplomarbeit ausgewählt. Nach einer Absprache über die Verwendbarkeit und die Realisierung des Tools für eine rückbegrenzte Pneumatiklogik wurde von Seiten der Firma ITI GmbH eine vollständig funktionsfähige Testversion für die Diplomarbeit zur Verfügung gestellt.

3.6.2 Vorbetrachtung des Tools

Das Programm SimulationX bietet dem Anwender über eine 2D Oberfläche die Möglichkeit, ein Modell grafisch-interaktiv zusammenzustellen und zu bearbeiten. Über eine Bibliothek sind Objekte aus den Fachgebieten Antriebstechnik, Elektrotechnik, Fluidtechnik, Mechanik, Regelungstechnik und Thermodynamik auswählbar. Diese Bausteine müssen über die Oberfläche zweckmäßig miteinander verbunden werden und desweiteren richtig konfiguriert und eingestellt sein. Für das jeweilige Modell müssen vor der ersten Berechnung Parameter eingegeben werden, um die Simulationssteuerung zu bestimmen. Für das Modell der Diplomarbeit wurden ausschließlich Komponenten der Elektrotechnik und Pneumatik aus der Bibliothek gewählt und miteinander verbunden. Abbildung 30 zeigt die Programm-Oberfläche von „SimulationX“.

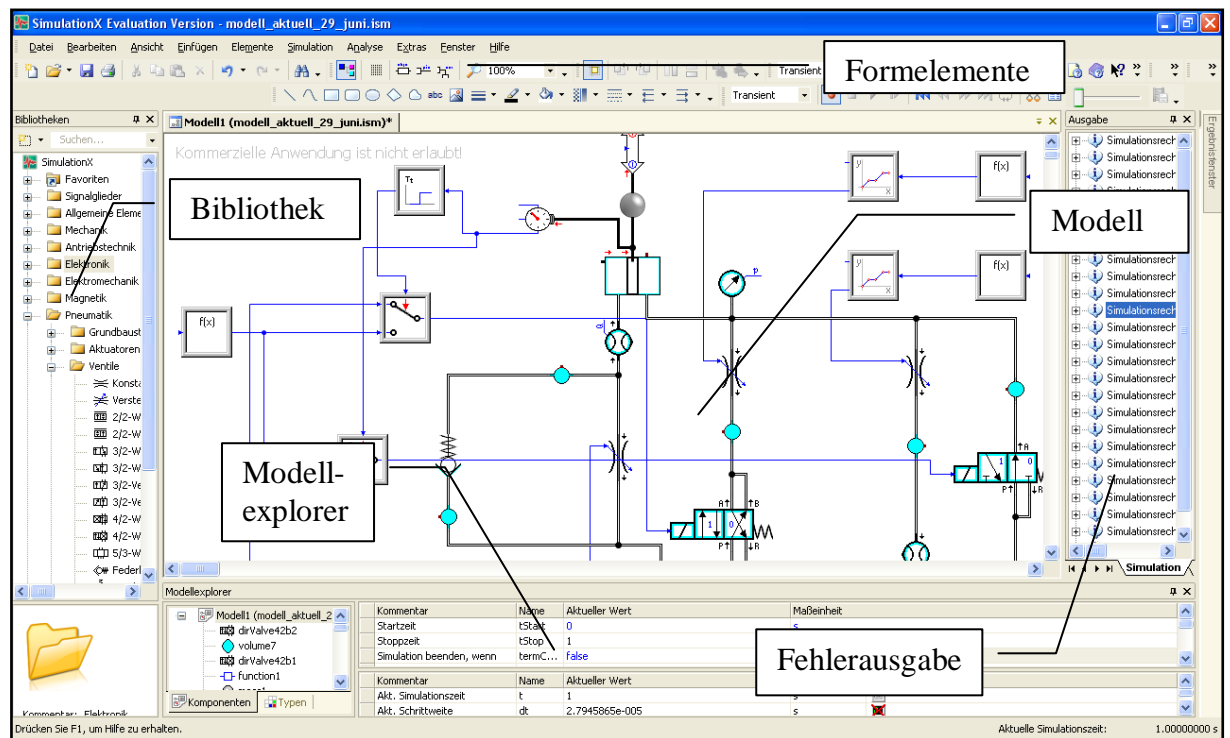


Abbildung 30: Bedienoberfläche „SimulationX“ /ITI/

Die Bausteine werden per „Drag and Drop“ gewählt und auf die Modelloberfläche gesetzt. Man kann diese nun parametrieren und die sogenannten Ergebnisgrößen festlegen, welche nach der Berechnung in einem Diagramm angezeigt werden. Diese Größen lassen sich für spätere Auswertungen in verschiedenen Variationen darstellen und können in einem Protokoll festgehalten werden. Es wurden schon im Voraus jeweils sinnvolle Größen gewählt, die für das jeweilige Objekt für den Nutzer von Interesse wären. Im Programm steht weiterhin ein Modellexplorer zur Verfügung, welcher im Schnellformat die eingestellten Parameter der einzelnen Bausteine darstellt. Für die Protokollierung der Berechnung und der Anzeige von Simulations- und Berechnungsfehler steht eine Fehlerausgabe bereit, die das Arbeiten mit dem Tool erleichtert. Wie man in Abbildung 30 erkennen kann, werden die einzelnen Modellelemente dem Nutzer in einer analogen Form der Schaltungslogik angezeigt, wie sie in der Fluidtechnik üblich sind. Dies ermöglicht eine kurze Einarbeitungsphase. Ein weiterer Vorteil des Tools im Gegensatz zu vergleichbaren Anwendungen ist die interne Verarbeitung von Gleichungen und Berechnungen. Es würde bei Modellierung von Bauteilen durch einzelne Gleichungen schnell der Überblick über die Gesamtheit des Modells verloren gehen und die Weitergabe des Modells für andere Anwender würde sich als problematisch erweisen.

3.6.3 Aufbau des Modells

Zu Beginn ist die Druckluftversorgung zu realisieren, dabei wurde ein Baustein für die Druckluftbereitstellung eingefügt, in welchem der Systemdruck von 6 bar eingestellt war. In dem Versuchsaufbau diente ein Versorgungsschlauch als Verbindung zum ersten Wegeventil. Dieser pneumatische Widerstand musste berücksichtigt werden, da dieser sich auf das Anfahrverhalten auswirkte. Man kann unter anderem den Durchmesser, eine Länge sowie eine Rauigkeit definieren. Nun konnte das erste Ventil eingefügt werden (Abbildung 31). Die Parameter, wie die c-b-Beschreibung, wurden vom Hersteller erfragt und eingefügt. Für das Schalterverhalten konnte mit der Eigenschaft „Dynamik“ ein niedrigerer Wert eingestellt werden, da im Versuchsaufbau Schnellschaltventile verwendet wurden. Dieser Wert kann nicht direkt erfragt, sondern musste aus Überlegungen heraus bestimmt werden. Im nächsten Schritt wurden die einzelnen Komponenten, sowie das Ventil mit einem Auslass, verbunden. Das Ventil musste zusätzlich noch mit einem Funktionsglied aus der Signallbibliothek vereinigt werden, welches das Schaltsignal liefert und somit der Vorgang startet. Für diesen Baustein war der Wert „1“ einzustellen.

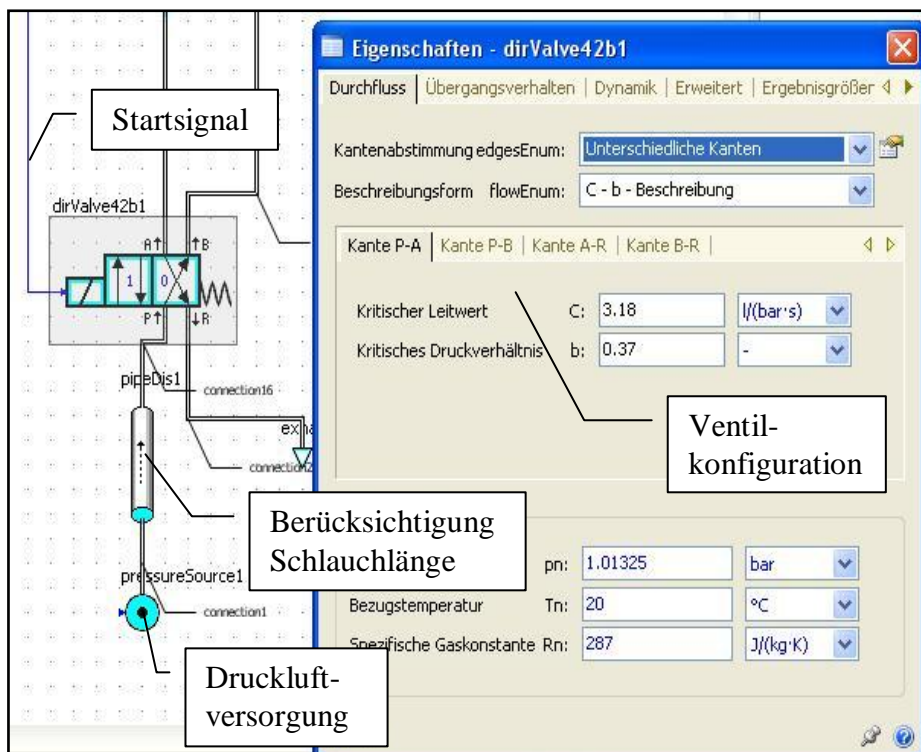


Abbildung 31: Aufbau des Versorgungsnetzes /ITI/

Im nächsten Schritt wurde das Drossel-Rückschlagventil in der Zuleitung zum Antrieb nachgebildet. Dieser Baustein war nicht direkt verfügbar, sondern musste aus 2 Bausteinen zusammengesetzt werden und zwar aus einem federbelasteten Rückschlagventil und einer verstellbaren Drossel. Da die Diplomarbeit nur die Ausfahrbewegung betrachtet, ist es ausreichend, nur das Rückschlagventil ins Modell zu integrieren. Für das Bauteil konnten aus dem Datenblatt die Parameter eingetragen werden. Abbildung 32 zeigt den grundsätzlichen Aufbau, sowie einen Block, welcher die Funktion eines Durchfluss-Sensors darstellt, wodurch man für spätere Analysen Werte gewinnen kann.

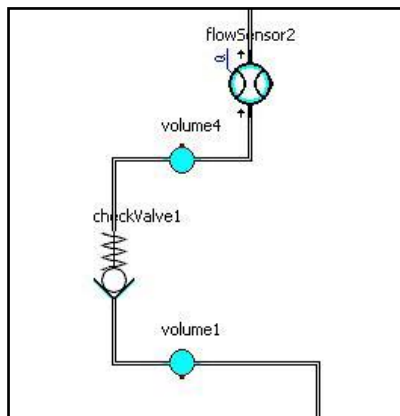


Abbildung 32: Aufbau Rückschlagventil /ITI/

Ein wesentlicher und entscheidender Punkt des Modells war die Simulation der Bewegung des Linearantriebs und die Realisierung der Schaltungslogik (Abbildung 33). Hierfür wurde aus der Bibliothek ein kolbenstangenloser Antrieb gewählt. Für diesen wurden die Werte, wie Hub und Durchmesser, eingegeben. Desweiteren musste ein Verhalten für die Reibung festgelegt werden.

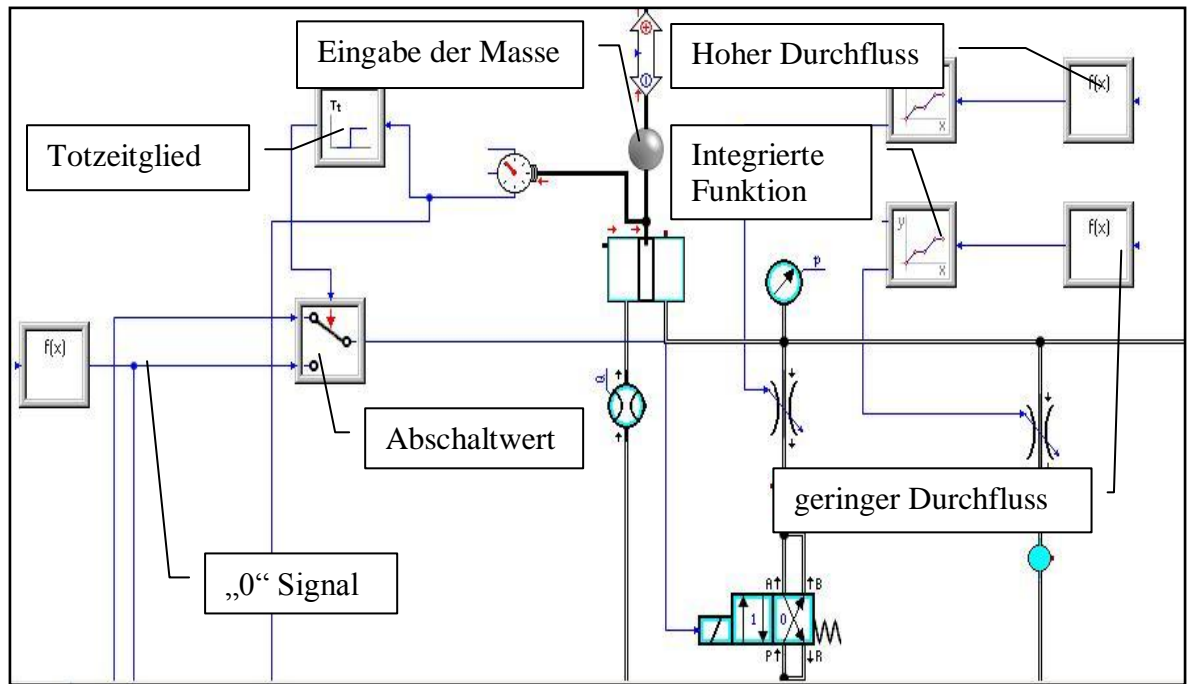


Abbildung 33: Aufbau Antrieb und Schaltungslogik /ITI/

In diesem Fall wurde auf ein sehr einfaches Modell zurückgegriffen, das mit Hilfe der Vorbetrachtungen die Haftreibung und über einen Federkraftmesser die Gleitreibung erfasste und integrierte. Über einen vorhandenen Anschluss wurde nun eine Masse mit dem Kolben verbunden, welche das bewegte Gewicht simulierte. Die Schaltungsumsetzung erfolgte folgendermaßen: es wurden 2 Drosseln zusammengeschaltet, welche mit einem Funktionsbaustein und einem nachgeschalteten Graph-Baustein verbunden waren. Der beim Funktionsbaustein einzutragende Wert gab an, wie weit die Drossel geöffnet sein sollte. In den Graph-Baustein konnte das Drosselverhalten integriert werden, so dass im Modell die Möglichkeit besteht, wie im Versuchsaufbau die Anzahl der Umdrehungen an der Regulierschraube anzugeben. Diese Vorgehensweise erleichtert das spätere Arbeiten mit dem Modell. Bei diesem Aufbau wurden für beide Bausteine, die Rückschlageventile vernachlässigt, welche im realen Versuchsstand aber vorhanden waren. Im Abluftzweig der Eildrossel wurde ein Ventil integriert, welches zu einem bestimmten Zeitpunkt schaltete. Dieses Ventil wurde mit einem Schalter verbunden, welcher vom Faktor „1“ auf den Faktor „0“ wechselte, wenn eine eingestellte Schaltschwelle erreicht war. Dieser Wert symbolisierte den Abschaltwert. Um diese Größe zu erfassen, wurde zwischen Schalter und Linearantrieb ein Sensor angebracht, welcher die aktuelle Wegposition lieferte. Wurde der Wert erreicht, war die Drossel für den Eilvorschub nicht mehr aktiv.

Um den Abschaltwert möglichst genau zu simulieren, wurde zwischen Sensor und Schalter ein Totzeitglied integriert, welches die Schaltverzögerung vom realen System darstellte. Im Versuchsstand entstanden durch die Steuerung, Sensoren und Ventile Verzögerungen von 25 ms. Dieser Wert wurde anhand von Datenblättern bestimmt. Desweiteren wurde für das Simulationsmodell ein weiterer pneumatischer Widerstand, bedingt durch den verbauten Verbindungsschlauch, eingefügt. Die Vereinfachung lag darin, dass vom realen Versuchsaufbau die Gesamtlänge der Schläuche erfasst und als ein summarisches Bauteil im Modell eingefügt wurde und nicht jeder pneumatische Widerstand als Element für sich. Dieses Vorgehen würde zudem die Simulationszeit wesentlich erhöhen. Ein weiteres Bauteil war ein Ventil, welches im Abluftzweig geöffnet wurde, wenn der Linearantrieb die Endlage erreicht hatte. Dieser Vorgang ist nicht zwingend notwendig, jedoch wurden so Schwingungen in der Endlage verhindert, welche durch die Vereinfachung des „elastischen Anschlags“ in der Endlage hervorgerufen wurden. Dieses Problem des Anschlages soll in späteren Versionen des Tools besser simuliert werden. Nachdem alle Bauteile nun richtig miteinander verbunden wurden, ließ sich die Simulation mit einer Ausgabeschrittweite von 1 ms starten. Über die einzelnen Ergebnisgrößen konnte man zum Beispiel nun den Weg und Geschwindigkeitsverlauf der Masse bzw. des Kolbens betrachten. Nachfolgende Diagramme wurden durch diese Methode erzeugt. Es besteht für dieses Beispiel auch die Möglichkeit, einen anderen Aufbau zu wählen bzw. das Modell zu erweitern, um z.B. den Einfluss pneumatischer Widerstände, wie T-Stücken und 90° Verschraubungen, zu untersuchen. Ein Vorteil für den ausgewählten Aufbau ist, dass das Verhalten analog der im Versuchsaufbau realisierten Schaltung ist, was eine spätere schnellere Änderung, Verknüpfung bzw. Erweiterung möglich macht. Zudem ist das Verständnis für den Aufbau bei einer Weitergabe an andere Nutzer besser, da es auf übersichtliche Art die Funktionsweise des Modells verdeutlicht. Ein Nachteil des Modells besteht darin, dass die im Versuchsaufbau angebrachten Vor- und Endanschlüsse in der Simulation nur über ein vor den Linearantrieb geschaltetes Volumen betrachtet werden können. Das heißt, man wählt als Hublänge im Baustein des Linearantriebes die Wegstrecke zwischen den Anschlüssen und muss dann eine Umrechnung in den Wert „Abschaltweg vor der Endlage“ vornehmen. So lassen sich auch die simulierten Werte gegenüber den durchgeführten Versuchsreihen beurteilen.

3.6.4 Ergebnisvergleich im Bezug zur Messreihe

Um einen Vergleich zu den am Versuchsstand gemessenen Werten zu ziehen, werden als Beispiel die Masse von 7,7 kg und verschiedene Zustellzeiten gewählt. Über das Simulationsmodell wurden Abschaltwerte bestimmt und danach mit dem realen Versuchsaufbau verglichen (Abbildung 34). Die Einstellung der Drossel-Rückschlagventile erfolgte analog zu den in den Versuchsreihen eingestellten Werten. Da das Verhalten der verwendeten Drosseln in das Simulationsmodell integriert wurde, sind die Einstellungen gleich. Aus dem ersten Vergleich wird deutlich, dass es möglich ist einen günstigen Abschaltwert über die Simulation zu finden. Die Abweichung beträgt im Durchschnitt 10 %, was für den Einsatz bei einer Einstellung an einer Anlage ausreichend ist. Da der Aufbau der pneumatischen Schaltung, besonders die Verbindungen der einzelnen Bauteile, unterschiedlich ist, kann selten ein Vorabschaltwert gefunden werden, der keine weitere Feineinstellung erfordert. Die Streuung des Wertes durch die pneumatischen Widerstände ist schon bei geringen Abweichungen zum Versuchsaufbau hoch. Jedoch lässt sich über die Simulation ein Richtwert finden, der nur noch einer minimalen Änderung bedarf. Insbesondere bei zunehmenden Massen, welche das System beruhigen, lassen sich günstige Abschaltwerte finden.

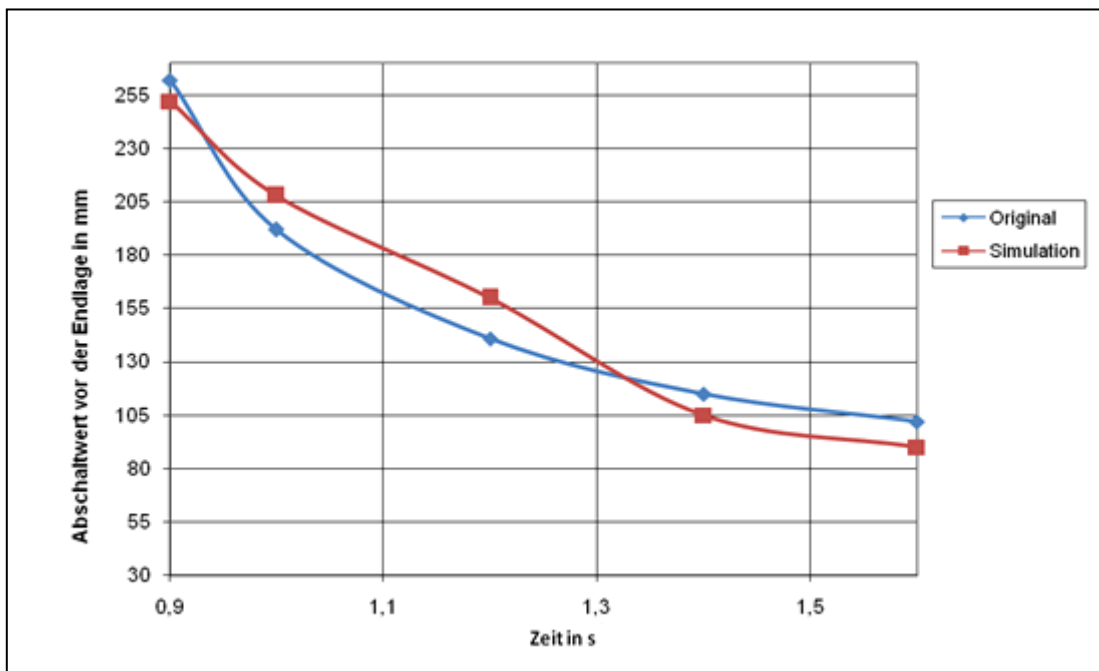


Abbildung 34: Vergleich Abschaltwert bei konstanter Masse

Eine weitere Möglichkeit, welche die Simulation bietet, ist die genaue Abbildung des Kurvenverlaufes. Der Vorteil ist einmal die Einfahrt in die Endlage zu beurteilen und desweiteren die Positionierzeit abschätzen zu können. Als Darstellungsbeispiel für genaue Übereinstimmung der Kurven dient Abbildung 35. Die Grundeinstellungen sind in der Simulation sowie in der Realität 6,75 Umdrehungen an der Regulierschraube. In beiden Fällen wurde ein Abschaltwert gewählt, welcher eine gute Dämpfung realisiert. Für eine Verkürzung der Positionierzeit wurden wiederum in beiden Fällen, der maximal mögliche Durchfluss eingestellt, sprich 11 Umdrehungen an der Regulierschraube. In der Simulation wurde für die nun höhere Geschwindigkeit eine neuer Abschaltwert gewählt und im realen Versuchsaufbau getestet. Das Resultat verdeutlicht die Abbildung 35. Die Verläufe unterscheiden sich nur geringfügig, da die Simulation eine Idealkurve darstellt und in der Realität gewisse Abweichungen auftreten können. Im Demonstrator konnte ein kurzzeitiges Verklemmen des Aktors festgestellt werden, was als Unstetigkeit im Geschwindigkeitsverlauf sichtbar war. Diese blieben unbeachtet, da bei Verwendung anderer Antriebe die im Versuchsstand aufgetretenen Abweichungen nicht mehr vorhanden sind. Aus diesem Grund wurde dieses Verhalten nicht berücksichtigt, sondern über eine Hüllkurve die Darstellung realisiert.

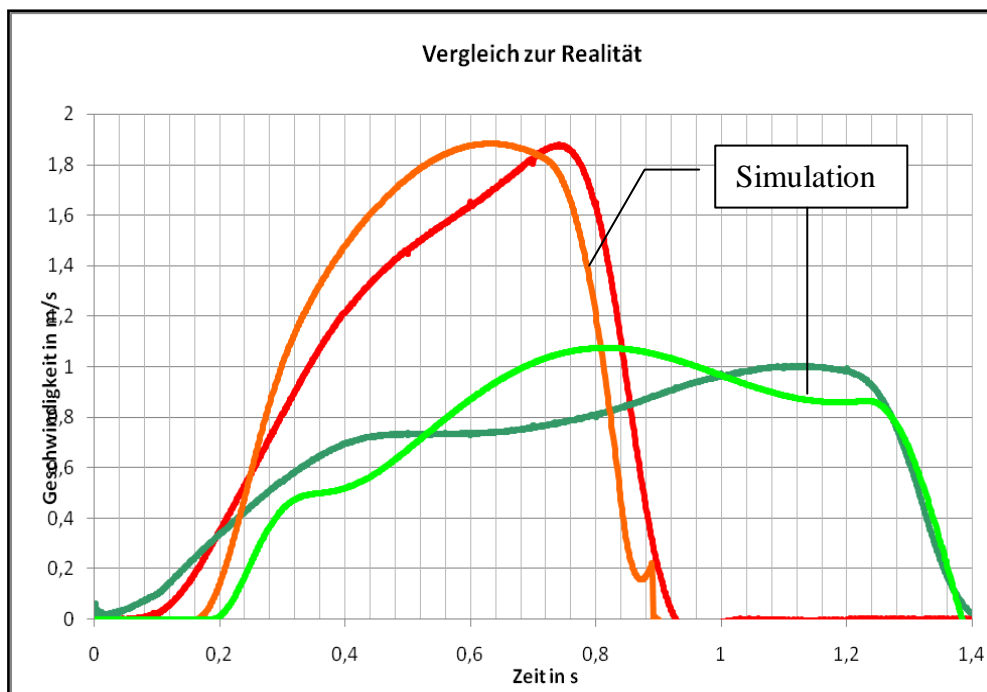


Abbildung 35: Vergleich Geschwindigkeitsverläufe bei 6,75 und 11 Umdrehungen

Ein letzter Vergleichspunkt ist der Vergleich der Abschaltpunkte vor der Endlage bei steigenden Massen (Abbildung 36). Die Einstellung der Drossel-Rückschlagventile ist konstant für einen maximalen Eilvorschub. Die maximale Abweichung liegt bei 20 %, wobei die Abweichung bei Massen ab 10 kg etwas höher ist.

Der Grund dafür liegt an der Beurteilung des Geschwindigkeitsverlaufes für eine optimale Einfahrt in die Endlage. Diese Beurteilung ist in diesem Fall etwas schwieriger, da es auch real problembehaftet ist, einen günstigen Abschaltwert, durch die hohe kinetische Energie größerer Massen bei hohen Geschwindigkeiten, zu finden. Wiederum sind die simulierten Werte in einer ausreichenden Toleranz, so dass auch in diesem Fall, nur noch eine Feineinstellung an den ermittelten Werten notwendig ist. Desweiteren ist für einen Betrieb mit Massen größer 10 kg empfohlen eine höhere Positionierzeit auszuwählen, da schon geringe Änderungen bzw. Schwankungen eine gut gedämpfte Einfahrt gefährden.

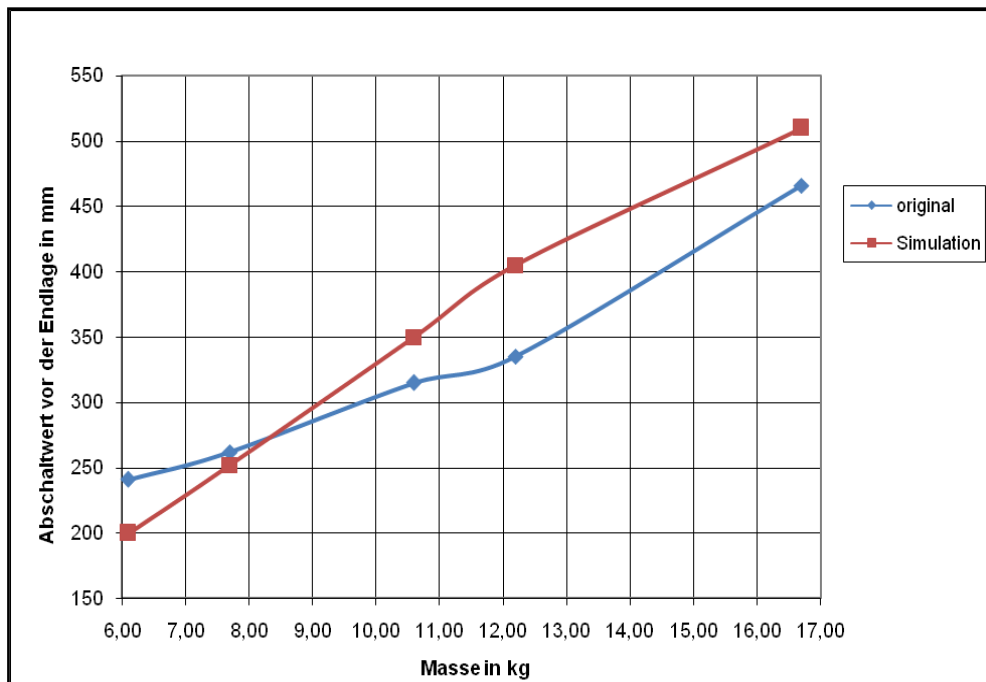


Abbildung 36: Vergleich Abschaltwert über konstante Drosseleinstellung

Eine weitere Analyse, welche durch das Modell gegeben wird, ist über die Druckverläufe Auswertungen zu machen. Über den Drucksensor-Baustein im Abluftzweig kann beispielsweise der Druckanstieg nach dem Schalten des Ventils und den Übergang auf Endvorschub beobachtet werden. In Abbildung 37 erkennt man, dass zu Beginn Systemdruck von 6 bar anliegt und beim Schalten des ersten Ventils der Druck abfällt, da die Zuleitung nun mit Druckluft versetzt wird.

Bei ca. 1,25 s ist der Anstieg des Druckes bis knapp unter 6 bar zu erkennen, was durch das Umschalten auf den geringen Durchfluss zu erklären ist. Würde der Druck über 6 bar steigen, würde der Aktor nicht bis in die Endlage fahren können.

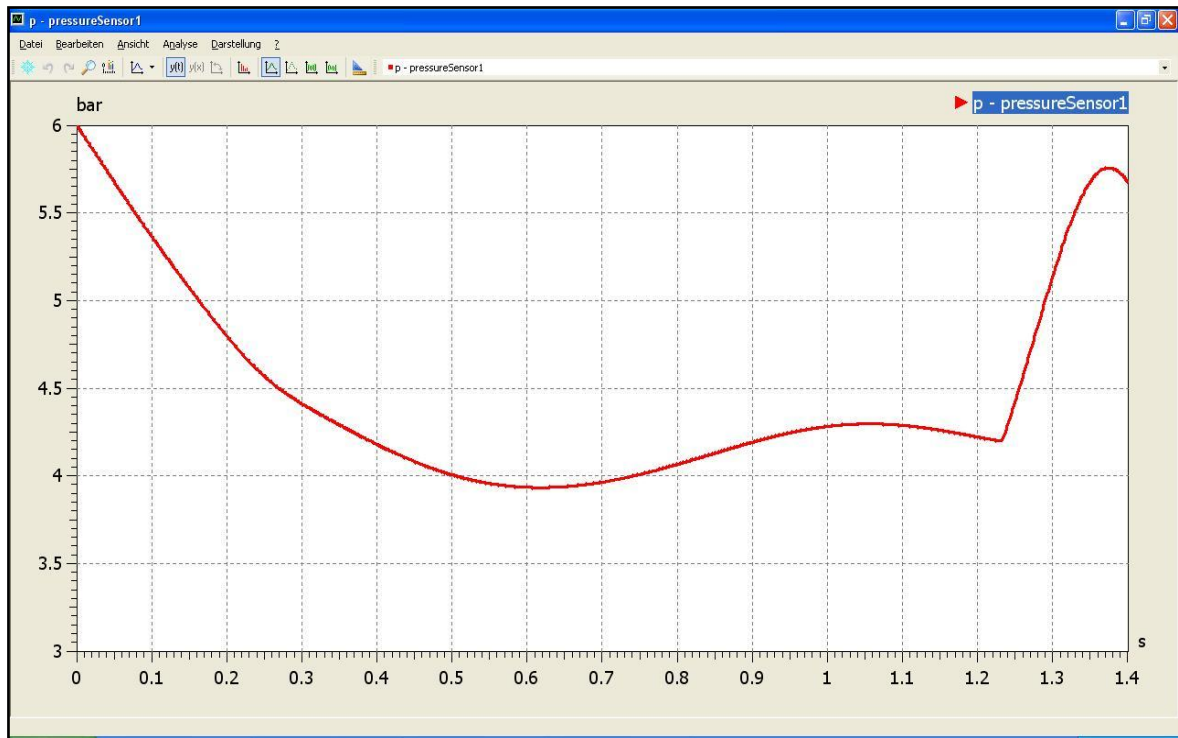


Abbildung 37: Druckverlauf

Abschließend betrachtet ist erkennbar, dass das Ziel erreicht wurde, Einstellparameter über Modellbildung zu finden. Die dabei aufgetretenen Toleranzen können vernachlässigt werden.

Es ist weiterhin festzustellen, dass für die Grenzfälle, geringes transportiertes Gewicht und Kolbengeschwindigkeiten unter 0,7 m/s, über das Simulationsmodell noch keine guten Werte ermittelt werden können. Der Grund dafür kann die Vereinfachung des Reibungsverhaltens sein, was bei geringen Geschwindigkeiten größeren Einfluss hat. Das heißt das Messverfahren für die Diplomarbeit ist zu ungenau und muss optimiert werden. Sollte ein genauerer Wert vorhanden sein, kann dann auch das Modell verfeinert werden und die Abweichungen wären geringer. Wiederum ist für die Betrachtung der Grenzfälle, niedrige Massen und geringe Geschwindigkeit, nicht so ein hohes Maß an Einstellbarkeit gegenüber der gedämpften Endlageneinfahrt notwendig. Da das Ziel immer eine hohe Geschwindigkeit für eine niedrigere Positionierzeit ist, wird diese Problemstellung nicht weiter betrachtet.

3.6.5 Vor- und Nachteile der vorgenommenen Simulation

Nachdem nun die Simulation durchgeführt wurde, soll eine Beurteilung über Problemstellung, Programm und Modell, die gewonnen Erkenntnisse zusammenfassen. Ein großer Vorteil des Tools liegt an der schnellen Anwendung, welche einmal durch die Übersichtlichkeit und durch ein Internetportal gegebenes Tutoriell des Herstellers, bedingt ist. Eine weitere Zweckmäßigkeit für einen schnellen Einstieg in das Tool, ist die Darstellung der Bauteile durch die üblich verwendete Symbolik in der Fluid- sowie der Schaltungslogik. Für die Auswertung sind die auswählbaren Diagrammdarstellungen günstig, da diese eine gute Übersicht über die Ergebnisse liefern. Ein bedeutender Vorzug ist, dass das Tool viele Berechnungen intern in den einzelnen Bausteinen verarbeitet. Auch die einfache schnelle Kontrolle von Werten ist möglich, indem man diverse Bausteine wie Sensoren an die Stellen setzt, welche von Interesse sind. Die Gefahr dieses Systems ist, dass man diverse Parameter angibt, jedoch nicht über ausreichende Kenntnisse verfügt, um die interne Verarbeitung zu verstehen. Das bedeutet, dass Werte eingegeben werden und beim Auftreten von Fehler nur abschätzt werden kann, durch welche evtl. falsch gesetzte Konstante dies hervorgerufen wurde. Ein weiterer Nachteil des Tools ist, dass nur begrenzt zusätzliche Berechnungen durchgeführt werden können, welche dann als Parameter an ein Bauteil übertragen werden. Diese Möglichkeit besteht bisher nur durch den Funktionsbaustein. Das wiederum hat zur Folge, dass eine Anleitung für die Nutzung des erstellten Modells verfasst werden muss, damit dieses sinnvoll eingesetzt werden kann. Das heißt eine automatische Methode, indem man definiert Parameter ändert und am Ende einen Wert ausgegeben bekommt, ist nicht realisierbar. Auch die Simulation für beispielsweise mehrere Abschaltwerte ist nur durch schrittweises Ändern möglich. Hierbei gibt es die Möglichkeit, eine Kurvenschar aus allen simulierten Werten in einem Diagramm darzustellen. Eine Verbesserung am Modell könnte die Verkürzung der Simulationszeit sein, welche relativ hoch ist und somit bei der Ermittlung von mehreren Werten relativ viel Zeit benötigt. Diese Zeit ist durch die integrierten pneumatischen Widerstände zu erklären, welche aber notwendig sind. Für spätere Auswertungen ist es möglich, mit dem Tool aus den Diagrammverläufen Dateien zu erzeugen, welche dann für weitere Anwendungen in ein Excel- Programm integriert werden könnten.

In der Gesamtbetrachtung war die Auswahl des Tools für die Problemstellung eine günstige Wahl, da alle einzustellenden und zu bestimmenden Werte im Modell vorhanden waren und im Vergleich zur Realität gute Einstellwerte ermittelten.

4. Auswertung der Ergebnisse

4.1 Vergleich der 3 Simulationsarten

Die in der Diplomarbeit betrachteten Möglichkeiten, Einstellparameter für eine pneumatische Zustellbewegung zu bestimmen und somit die Instandsetzung zu unterstützen, um die Verfügbarkeit zu steigern, ist auf verschiedene Art und Weise möglich. Für die Diplomarbeit wurden folgende Möglichkeiten betrachtet: eine experimentelle Bestimmung, eine Näherungsrechnung und ein Simulationsprogramm.

Werteermittlungen durch Experimente und Versuche sind im Vergleich der Ergebnisse genauer, aber der Zeitaufwand und die Notwendigkeit eines Versuchsstandes erweisen sich für einen praktischen Einsatz als ungünstig. Da bei einem Bauteilwechsel jeweils für die Erprobung neue Komponenten beschafft und integriert werden müssen, was hohe Anschaffungskosten erzeugt. Bei dieser Variante, benötigen die vorgegebenen Einstellwerte, noch eine Feinjustierung, da schon geringe Änderungen im Aufbau einer Pneumatikschaltung Einfluss auf das Ergebnis haben.

Im Vergleich dazu bietet auch eine Näherungsrechnung nur begrenzte Möglichkeiten. Was einmal daran liegt, dass ein Umbau bzw. der Aufbau eines solchen Modells relativ kompliziert ist und somit nur durch denjenigen geändert werden kann, welcher das Modell entworfen hat. Einzustellende Werte sind nur sehr ungenau ermittelbar, sodass die Lösung einer Einstellung, dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ gleicht.

Somit zeigt sich, dass sich die Möglichkeiten eines Simulationstools überwiegend als vorteilhaft erweisen, da sich Instandsetzungszeiten verkürzen und geringe Abweichungen gegenüber der Realität vernachlässigbar sind. Desweiteren bietet diese Lösung die Option schnell Änderungen am Modell vornehmen zu können und somit variabel auf verschiedene Problemstellungen reagieren zu können. Abwandlungen sind bei der Festlegung der Parameter, aber auch bei der kompletten Pneumatik Logik möglich. Diesem entgegen zu setzen ist, dass Schulungs- und Lizenzkosten entstehen, daher ist eine genaue Bedarfsanalyse für den Simulationseinsatz durchzuführen, damit ein Gleichgewicht im Kosten-Nutzen-Verhältnis entsteht.

4.2 Anwendungsmöglichkeiten von SimulationX

Aus den Ergebnissen der Diplomarbeit ist ersichtlich, dass über Simulation Einstellparameter bestimmt werden können. Der praktische Nutzen ist jedoch dadurch eingeschränkt, dass nicht jeder Servicemitarbeiter ein Simulationstool zur Verfügung hat. Einmal bedingt durch hohe Lizenzkosten und zum Anderen durch fehlende Erfahrung und Kenntnisse im Umgang mit dem Tool. Für einen Einsatz in der SITEC wäre sinnvoll, dass eine bestimmte Anzahl an Lizenzen vorhanden ist, die von Pneumatik-Konstrukteuren genutzt werden können. Diese haben die Aufgabe für jede Schaltung ein Modell zu entwerfen und eine Erklärung, für dieses direkt im Modell oder über eine separate Textdatei beizufügen. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass auch andere dieses Modell nutzen können und somit nicht noch einmal ein gleicher Grundaufbau entworfen werden muss, wodurch Kosten und Zeit gespart werden.

Bevor die Weitergabe an die Servicemitarbeiter erfolgt, müssen die Grenzen für Positionierzeiten und transportierte Massen festgelegt werden. Für alle nun entstehenden Kombinationen müssen über die Simulation, die günstigsten Werte berechnet werden. Das bedeutet, es muss eine Werteschar ermittelt werden, wie sie ähnlich der in der Diplomarbeit experimentell bestimmten Werte ist. Die Weitergabe an einen Service-Techniker könnte nun über einfache Tabellen oder Diagramm möglich sein. Eine weitere Option wäre die Möglichkeit z.B. in Form eines VBA Programms eine Bibliothek zu programmieren. Beim Öffnen des Tools können entweder Werte eines bestimmten Linearantriebs ausgewählt oder zum Anderen die Bibliothek erweitert werden. Bei der Erweiterungsfunktion würde man den vorhanden Hub und Kolbendurchmesser wählen und danach Werte an das System übergeben. Das System müsste nun Diagramme ermitteln bzw. zusammenstellen oder eine Wertetabelle generieren, aus welcher man später einen günstigen Einstellwert entnimmt. Die Erstellung einer solchen Bibliothek hat den Vorteil, dass diese immer wieder mit neuen Antriebskombinationen erweitert werden kann und somit immer weniger Simulationen durchgeführt werden müssten. Nach kurzer Zeit wäre der Bestand an Kombinationen bei SITEC abgedeckt, da größtenteils baugleiche Antriebe verwendet werden.

4.3 Empfehlungen für den Einsatz von Simulation bei der ruckbegrenzten Zustellbewegung

Da besonders im Sondermaschinenbau unterschiedlichste Anforderungen und Aufgaben auftreten können, entsteht eine hohe Bauteilvarianz. Diese treten auch bei der Verwendung von pneumatischen Zustellbewegungen, durch die unterschiedlichen Abmaße, auf. So können beispielsweise in einer Anlage 10 verschiedenen Achsen verbaut sein, jedoch wäre der Zeitaufwand zu hoch, wenn bei jeder dieser Zustellungen Versuchseinstellungen nach einer Reparatur durchgeführt oder auch Einstellungen der Achsen bei Inbetriebnahme erfolgen würde. Die Diplomarbeit hat jedoch belegt, dass eine Einstellung durch ein Simulationstool problemlos erfolgen kann. Folgende beispielhafte Experiment wurde als Beweis für die Möglichkeit der Nutzung durchgeführt: über die vorhandenen Endanschläge am Versuchsstand wurde der Hub auf 500 mm verkleinert und durch Simulation die günstigsten Werte bestimmt (Abbildung 38). Die eigene Vorgabe dafür war die kürzeste Positionierzeit bei 5 kg und eine gute Endlagendämpfung. Aus der Simulation wurde eine Zustellzeit von 0,7 s bei einer maximalen Geschwindigkeit von 1,5 m/s ermittelt. Die dafür gewählten Einstellungen waren 7,5 Umdrehungen an der Regulierschraube für Eilvorschub und die Befestigung des Näherungssensors 185 mm vor der Endlage.

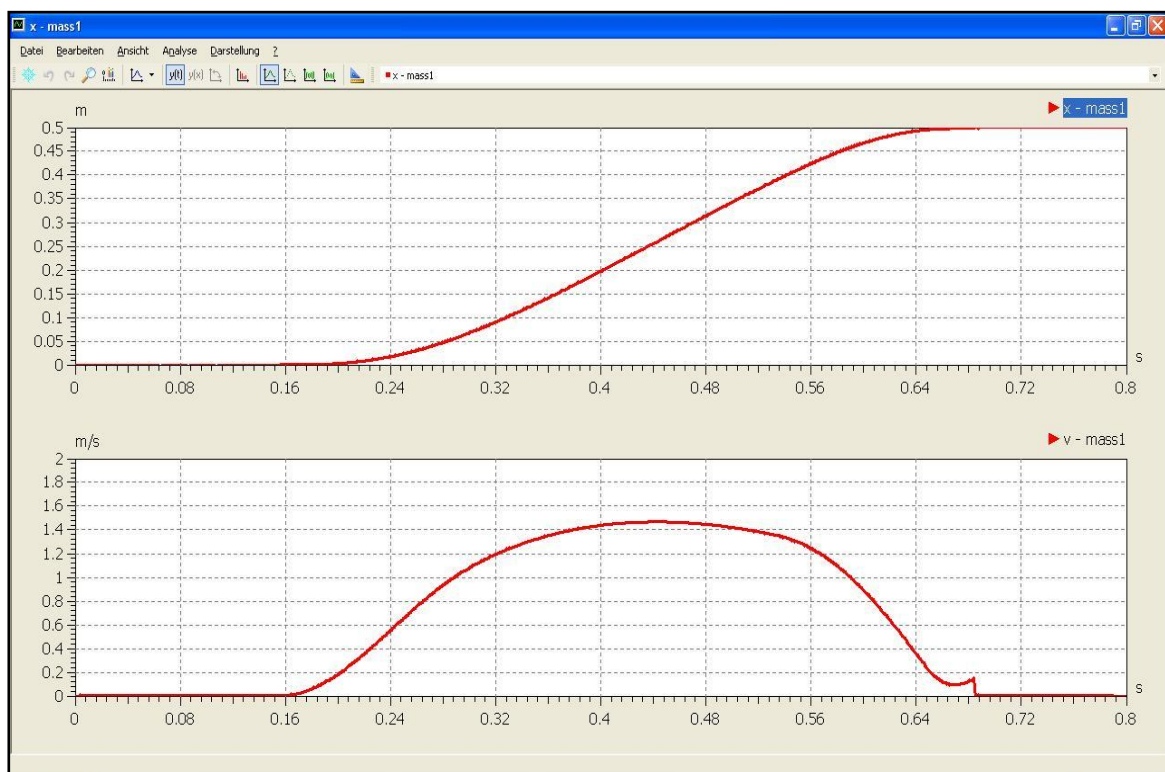


Abbildung 38: Ermittlung Einstellwerte bei einem Hub von 500 mm

Diese Werte wurden nun am Versuchsstand eingestellt. Abbildung 39 zeigt, dass die Parameter auch bei diesem Versuch zutreffend sind.

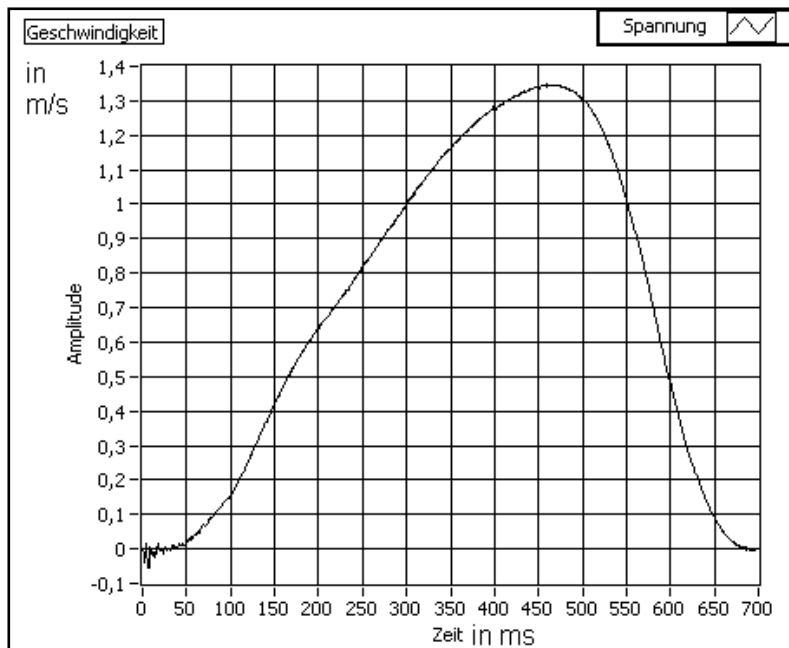


Abbildung 39: Vergleich mit Versuchsstand

An diesem Beispiel ist das Potential für die Unterstützung durch Simulation erkennbar. Weitere mögliche Änderungen wären die Verringerung des Kolbendurchmessers oder auch die Veränderung des Betriebsdruckes. Da bei der SITEC ein Standardbetriebsdruck von 6 bar vorgeben ist, blieb die Betrachtung bei Druckveränderungen außen vor.

Beim Kolbendurchmesser wurde aus Zeitgründen kein Umbau realisiert, um einen Vergleichstest durchzuführen. Für diesen Fall wurden ausschließlich Berechnungen im Simulationstool vorgenommen und als plausibel erklärt. Desweiteren sind mit dem Tool SimulationX auch Energiebetrachtungen oder die Analyse von Problemen, die durch die Verbindung einzelner Pneumatikbauteile bedingt sind, denkbar. Erste Durchflussskennwerte konnten für die Druckluftzuführung ermittelt werden. Ein Beispiel zeigt die folgende Tabelle 11. Hier wurde einerseits mit Simulation und andererseits mit einem Durchflussmesser an der Anlage ein Vergleich gezogen. Für beide Erprobungen waren die Einstellung an der Regulierschraube sowie das transportierte Gewicht gleich.

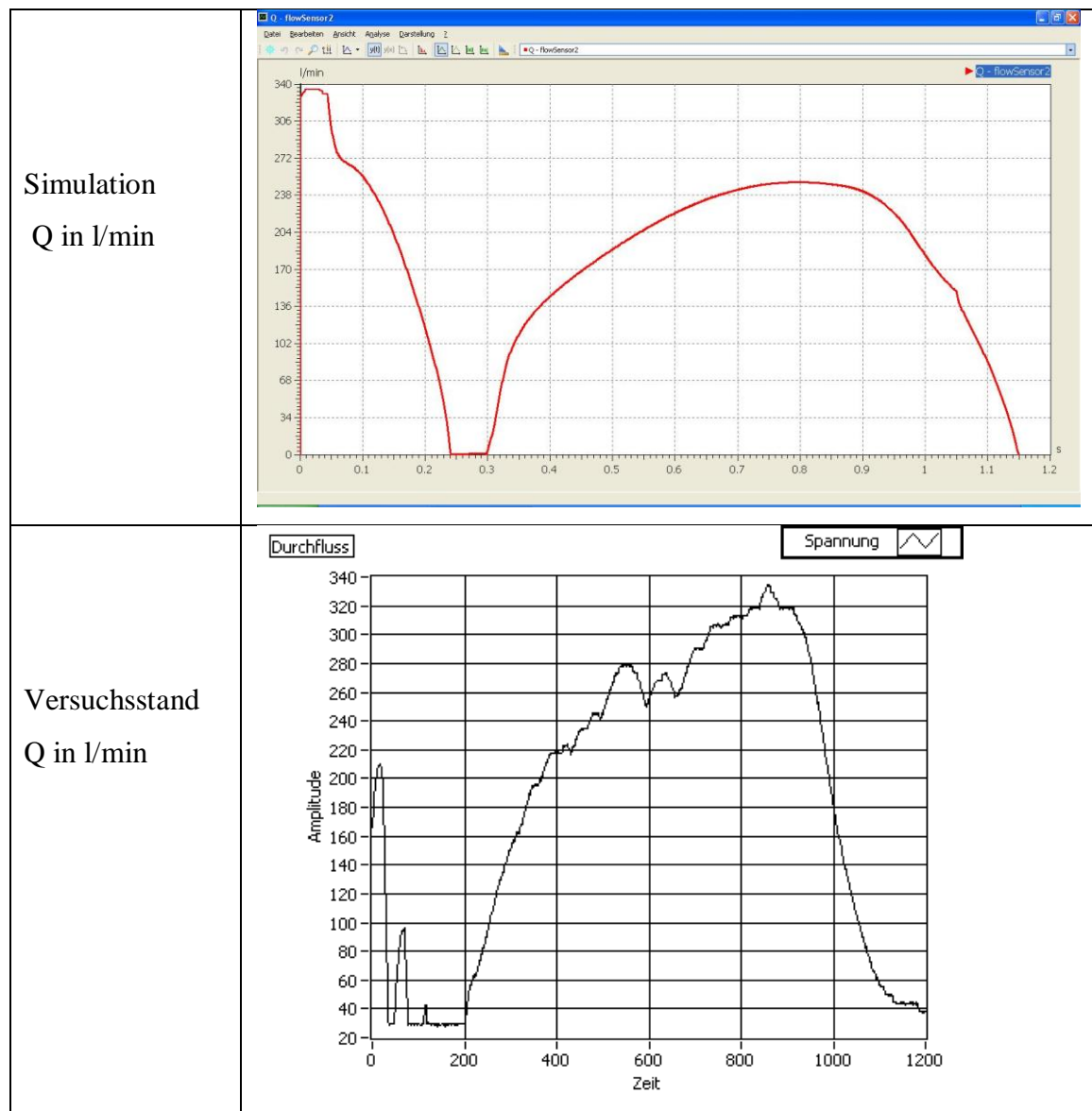


Tabelle 11: Vergleich Durchfluss

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass ein ähnliches Verhalten beobachtet werden kann, aber noch Unterschiede vorhanden sind, welche aber mit Verfeinerung des Modells beseitigt werden könnten. Auch für diese Anwendung ist das gewählte Simulationstool geeignet und anwendbar. Je nach Erfahrung des Nutzers lassen sich auch Versuche durchführen, um beispielsweise neue Ideen für Pneumatikschaltungen zu testen. Das hätte den Vorteil, wie im Falle der Diplomarbeit, schon im voraus Aussagen über die Realisierbarkeit treffen zu können. Da das Programm SimulationX auch Berechnungen für Hydraulik zulässt, wäre ein weiterer Einsatz für die SITEC denkbar. Da das Tool im Bereich von einem halben Jahr immer wieder Updates und Verbesserungen auf den Markt bringt, kann auch eine Erweiterung durch die Simulation von elektrischen Achsen oder Spindeln möglich sein.

4.4 Beispiel für eine Assistenzhilfe

Um nun aus der Diplomarbeit heraus Erkenntnisse für den praktischen Gebrauch an Servicetechniker weitergeben zu können, ist eine Assistenzhilfe notwendig. Dafür wurde in Zusammenarbeit der SITEC mit dem Projektpartner ATB eine solche Hilfe entwickelt. Diese Assistenz stellt mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, um anhand des Demonstrators zu verdeutlichen, wie man für Instandsetzung Hilfestellung geben kann. Über eine Web-basierte Umgebung kann der Nutzer sich in drei Kategorien einordnen, in Bediener, Servicepersonal oder Experte. Diese Nutzer können nun, falls ein Problem mit der Anlage auftritt, eine Beurteilung über Fehlerzustand, Fehlerlokalisierung und Fehlerbehebung durchführen. Der Nutzer kann bei den 3 Fehlerkategorien, durch sein Fachwissen, jeweils zwischen der Einstufung „einfach“ und „schwer“ unterscheiden. Anhand dieser Übersicht wird für den Nutzer eine Auswahl ermöglicht, um das richtige Verfahren für die Fehlersuche zu finden. In dieser Auswahl ist schon die jeweilige Qualifikation des Nutzers bedacht und über eine Kennzeichnung wird ihm eine Empfehlung für die optimale Fehlersuche gegeben. Der Nutzer wird entweder auf eine manuelle, geführte oder vollautomatische Suche weitergeleitet. Bei einer manuellen Suche ist die Fehlerlokalisierung sehr schwierig. Aus diesem Grund werden alle anlagenspezifischen Dokumente und Tools zur Verfügung gestellt. Diese Suche ist primär nur für Experten oder Service-Personal geeignet. Über eine geführte Suche wird mittels in Beziehung stehender Fragestellungen, die Fehlerursache eindeutig oder mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit lokalisiert. Diese Suchoption wird auch Experten und Servicepersonal empfohlen. Bei der vollautomatischen Fehlersuche, wird der Fehler eindeutig über einen Code angezeigt. Die Umsetzung wird über ein Assistenzsystem realisiert, welches den Nutzer zur Lösung führt. Über die SPS müsste eine Fehlerüberwachung eingefügt werden, welche z.B. über eine BCD-Anzeige Fehlercodes ausgibt. Das bedeutet, der Nutzer müsste beim Auftreten eines Fehlers den Code aus der Anzeige lesen und würde über die Assistenzhilfe eine Handhabung erhalten, um dieses Problem zu lösen. Dieser Fall kann aber nur eintreten, wenn der entstandene Fehler bei der Konzipierung möglicher Probleme mit beachtet wurde. Ist kein Fehlercode oder keine mögliche Ausgabe vorhanden, kann über die Assistenzhilfe eine der anderen Suchoptionen genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit des Nutzers bei dieser Assistenzhilfe ist der schnelle Zugriff auf Informations- und Datenblätter.

Für das Beispiel der Diplomarbeit wurden Dokumente für die einzelnen Pneumatik-Bauteile der Firma Festo AG & Co. Kg zur Verfügung gestellt. Das hat den Vorteil, bei Fragen schnell Zugriff auf Bauteilinformationen zu haben und keine schwerfällige Suche über die Herstellerseite beginnen zu müssen. Zu diesen Möglichkeiten kommt in einer ähnlichen Form, des programmierten VBA Programm, eine Einstellhilfe hinzu. Diese soll nun bei Fehlern, welche durch z.B. eine schlechte Endlagendämpfung bedingt ist, Hilfestellung geben. Desweiteren besteht die Möglichkeit definierte Änderungen bei neuen Bedingungen vorzunehmen z.B. eine höhere Masse. Um damit bei Neueinstellung an einer Anlage in kurzer Zeit günstige Werte zu erhalten, ohne nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ Einstellungen vornehmen zu müssen. Eine letzte Funktion, die eine Assistenzhilfe erfüllen muss, sind diverse Trainingsmodule, welche den Service-Techniker schnell mit kurzen Lerninhalten über passende Themen z.B. Sensoren informiert. Abbildung 40 soll noch einmal eine Übersicht über die realisierte Assistenzhilfe geben. /ATB/

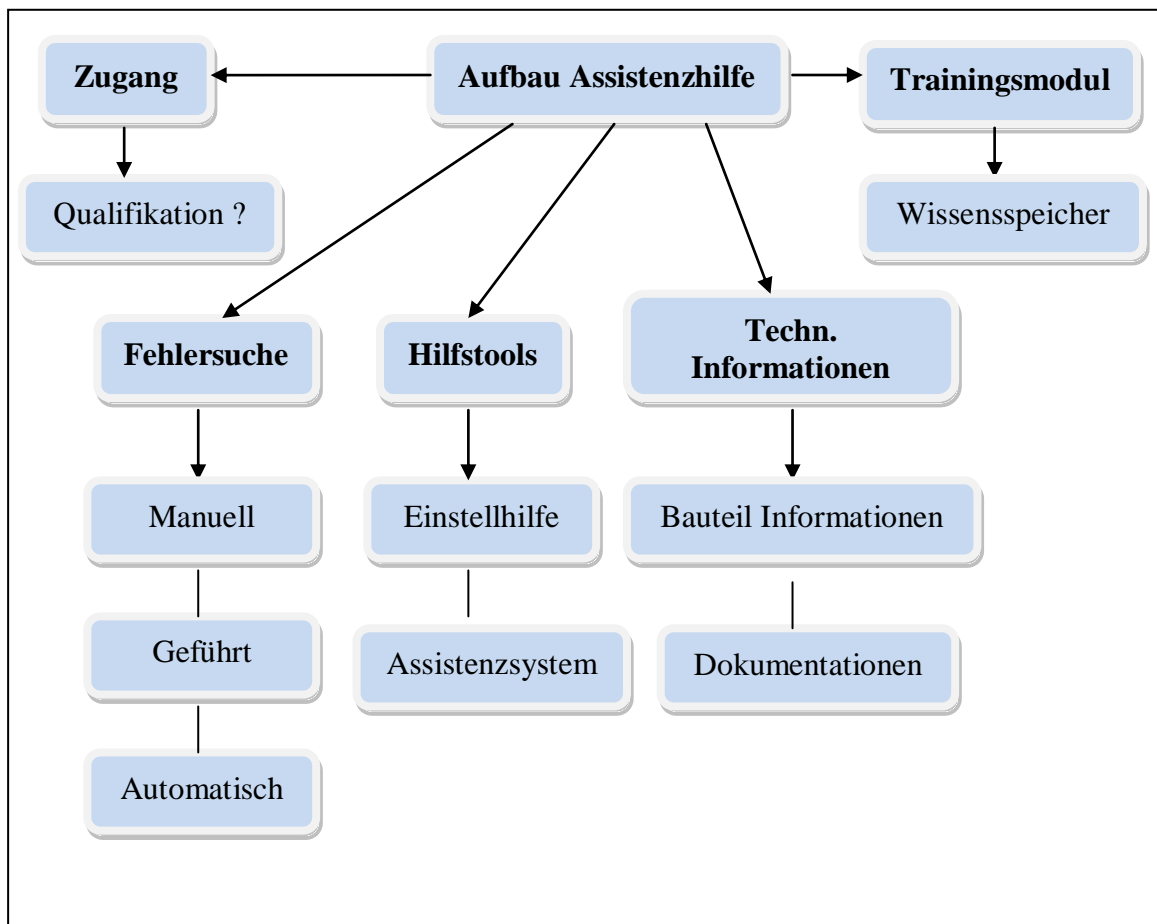


Abbildung 40: Aufbau Assistenzhilfe in Anlehnung an /ATB/

5. Zusammenfassung

Das Ziel der Diplomarbeit war ein Beispiel für die Modellgestützte Instandsetzung umzusetzen und die Praktikabilität der Unterstützung durch Simulation zu überprüfen. Dabei sollte eine einfache ruckbegrenzte pneumatische Zustellbewegung in Abhängigkeit von Masse und Geschwindigkeit einstellbar und simulativ optimiert werden. Dieses Ziel ist nach Ansicht des Autors erreicht wurden.

Für die Diplomarbeit konnte eine einfache Pneumatiklogik entworfen werden, welche im Vergleich zu dem bisher genutzten und sehr preisintensiven Servoantrieb ähnlich kurze Zustellzeiten, sowie eine gute Endlagendämpfung besitzt. Besonders die Qualität der Ruckbegrenzung ist für einen praktischen Einsatz bei SITEC gut geeignet. Das Problem, was bei der einfachen Schaltung entstand, war die Schwierigkeit der Einstellbarkeit. Für diese Aufgabe konnte kein einfacher analytisch beschreibbarer Zusammenhang gefunden werden, sondern die Berechnung wurde über ein bereitgestelltes Simulationstool durchgeführt. Nach der Erstellung und Berechnung eines Modells wurde sichtbar, dass die Möglichkeit besteht, reale Werte für die Einstellbarkeit zu ermitteln. Es wurde ein Vergleich gezogen und als Ergebnis festgestellt, dass die Einstellparameter zwischen Versuchsstand und Simulation nur geringe Abweichungen aufweisen. Darüber hinaus wurde anhand eines weiteren Beispiels gezeigt, dass mit dem Simulationsmodell sehr schnell günstige Parameter gefunden werden können, auch wenn Grundeinstellungen z.B. Hublänge verändert werden. Insgesamt ist deutlich, dass der Vorteil der Simulation einerseits bei der Realisierbarkeit einer schnellen Einstellbarkeit liegt und andererseits bei der Flexibilität eines Modells. Der Wechsel von Bauteilen wie Drosseln und Ventilen wurden in der Diplomarbeit nicht untersucht. Nur für die gewählten Bauteile des Versuchsstandes wurde ein Modell erzeugt. Bei Änderung dieser Teile, muss die Wahl der Parameter in dem Modell neu bedacht werden. Anhand der Erläuterungen im Kapitel 3.6.3 ist diese jedoch problemlos möglich. Insgesamt wurde gezeigt, dass Modellbildung eine gute Methode ist, um die Instandsetzung zu unterstützen, was zur Folge hat, dass die MTTR sinkt und somit die Verfügbarkeit einer Anlage wesentlich steigt. Anhand der Diplomarbeit wurde bewiesen, dass Simulation ein günstiges Hilfsmittel für Instandsetzung sein kann, aber erst über eine Darstellung in einem Assistenzprogramm ein praktischer Nutzen realisierbar ist.

In Zusammenarbeit mit einem Projektpartner der SITEC konnte aufgezeigt werden, wie man einem Service-Mitarbeiter eine Einstellbarkeit darstellt und erläutert. Als nächster Schritt ist diese entstandene Servicehilfe zu erweitern, um die Varianz an Antrieben zu erhöhen.

6. Ausblick

In der Diplomarbeit wurde gezeigt, dass Modellbildung für eine pneumatische Zustellbewegung nutzbar ist. Für weitere Anwendungen muss nun aber geprüft werden, inwieweit sich Wandlungen an der bestehenden Schaltung auswirken. Das heißt, bei der Verwendung anderer Ventile oder Drossel-Rückschlagventile muss geprüft werden, inwieweit diese Auswirkung auf das bestehende Modell haben. In jedem Fall muss erprobt werden, wie man für verschiedene Drosseln das unterschiedliche Verhalten von Umdrehungen an der Regulierschraube zum Durchfluss integrieren kann. Hierfür wären weitere Experimente notwendig. Als nächstes ist zu kontrollieren, ob das Modell auch für unterschiedliche Kolbendurchmesser gute Einstellparameter ermitteln kann. In diesem Fall wäre ein Vergleich über den bestehenden Versuchsstand möglich, da nur der Linearantrieb gewechselt werden müsste. Die Auswahl dieser Kolben müsste man in Abhängigkeit der am häufigsten bei SITEC verwendeten Elemente bringen.

Für den allgemeinen Fall der Modellgestützten Instandsetzung sind weitere Beispiele zu suchen, wo eine Unterstützung durch Vorbetrachtungen sinnvoll wäre. Es sollte aber immer beachtet werden, dass man Veränderungen und simulierte Werte so darstellen muss, dass diese ohne Kenntnis von Modellbildung nutzbar sind. Ein weiterer Anwendungsfall, der immer häufiger an Bedeutung gewinnt und auch mit Modellbildung betrachtet werden könnte, sind Energiebetrachtungen bzw.-vergleiche, in welchen man über ein Simulationsmodell diverse Schaltungen in ihrem Verbrauch miteinander vergleicht und dann darüber Aussagen treffen kann. Der Vorteil auch hier ist, dass kein Versuchsaufbau notwendig wäre. Hinzu kommen auch Hydraulikanwendungen, welche besonders mit dem im Diplom gewählten Tool besonders gut simulierbar wären, wo man für Anwendungsgrenzen zwischen Hydraulik und Pneumatik eine Auswahl treffen könnte. Natürlich sind auch reine Hydraulikanwendungen bzw. Schaltungen realisierbar, um z.B. mögliche Kräfte berechnen zu können. Desweiteren sind auch in der Hydraulik Einstellparameter ermittelbar und stellen somit ein weiteres Beispiel für Modellgestützte Instandsetzung dar.

Literaturverzeichnis

- /ATB/ ATB Services GmbH: Präsentation Zuarbeit VerMont.
Chemnitz, 2009
- /DUB/ Grote, K.–H. : Feldhusen, J. : Dubbel 2005: Taschenbuch für den
Maschinenbau. – 21. Aufl. – Berlin: Springer–Verlag, 2005
- /ESCH/ Eschmann, Robert: Modellbildung und Simulation pneumatischer
Zylinderantriebe. –1994. –152 S. Aachen, Technische
Hochschule, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 1994
- /ESTA/ unbekannter Autor : 4/3–Proportional Wegeventil. URL:
<[https://ecom2.stasto.com/oc/_common/data/
funktionsbilder/PRM2063Z11B3024EK.gif](https://ecom2.stasto.com/oc/_common/data/funktionsbilder/PRM2063Z11B3024EK.gif)>,
verfügbar am 24. April 2009
- /FEST/ Festo AG & Co. KG – Pro Pneu: Simulation von Pneumatik.
URL: <[http://www.festo.com/INETDomino/coorp_sites/de/61d22
ceb41391b1ac1256b41003afdaf.htm](http://www.festo.com/INETDomino/coorp_sites/de/61d22ceb41391b1ac1256b41003afdaf.htm)>,
verfügbar am 15. März 2009
- /FLUI/ Festo AG & Co. KG – Fluid Draw: Pneumatische Schaltkreise
erstellen. URL: <http://www.festo.com/cms/de_de/3242.htm>,
verfügbar am 15. März 2009
- /ITW/ DATACOM Buchverlag GmbH – ITWissen.info: Das große
Online-Lexikon. URL: <[http://www.itwissen.info/
definition/lexikon/Simulation-simulation.html](http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Simulation-simulation.html)>,
verfügbar am 27. Juli 2009
- /ITI/ ITI GmbH – SimulationX. URL: <[http://www.iti.de/cms/
simulationx.html](http://www.iti.de/cms/simulationx.html)>, verfügbar am 29. Juli 2009

- /JAEG/ Jäggi, Hansjörg: Servoachsen richtig ausgelegt. URL:
<[http://www.aktuelletechnik.ch/Web/InternetAT.nsf/0/0E5F3FC03902A1BFC12574D4005A2C4D/\\$file/HR-08-Jaeggi.pdf?OpenElement](http://www.aktuelletechnik.ch/Web/InternetAT.nsf/0/0E5F3FC03902A1BFC12574D4005A2C4D/$file/HR-08-Jaeggi.pdf?OpenElement)>, verfügbar am 24. April 2009
- /KÖHL/ Köhler Jens: Optimierung der Automatisierungsstruktur mechatronischer Montageanlagen. –2008. –180 S. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Diplomarbeit, 2008
- /KRET/ Kretzschmar, Hans–Gerhard: Lehrhilfsmittel Pneumatik 2008. –22 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau / Feinwerktechnik, 2009
- /LGA/ SMC Pneumatik GmbH: Linearantriebe. URL:
<http://217.19.37.249/at/pdf/LG1_Antriebe.pdf>, verfügbar am 24. April 2009
- /PMO/ Endig, Martin: Mewes, Frank: PMO Services – Das Allroundtalent für Industrieanlagen. In: IFFOCUS. – Magdeburg: Fraunhofer IRB Verlag – 2006 Heft–Nr.2, S.54
- /SIMD/ Chelvier, René: Wickborn, Fabian: Simulation. URL:
<<http://www.sim-md.de/sommeruni/intro.pdf>>, verfügbar am 27. April 2009
- /SITE1/ SITEC Industrietechnologie GmbH: SITEC– Firmenpräsentation. Chemnitz, 2009
- /SITE2/ SITEC Industrietechnologie GmbH: Meilenstein 2003. URL:
<http://www.sitec-chemnitz.de/cms/front_content.php?idcat=79&idart=1281>, verfügbar am 23. April 2009

- /SITE3/ SITEC Industrietechnologie GmbH: Sitec Variomodul Konzept Präsentation. Chemnitz 2009
- /SITE4/ SITEC Industrietechnologie GmbH: Variomodul. URL:
<http://www.sitec-chemnitz.de/cms/front_content.php?idcat=85>,
verfügbar am 25. April 2009
- /VOGE/ Deppert, Werner: Stoll, Kurt: Pneumatik Anwendungen. –2.Aufl.
–Würzburg: VOGEL Buchverlag, 1990
- /WAT/ Watter, Holger: Hydraulik und Pneumatik. –2 Aufl. –Wiesbaden:
VIEWEG TEUBNER, 2008
- /WIK/ unbekannter Autor: Wikipedia – Ruck. URL:
<<http://de.wikipedia.org/wiki/Ruck>>,
verfügbar am 24. April 2009
- /ZOEB/ Zoebel, Heinz: Pneumatikfibel. –2.Aufl. –Mainz: Krausskopf-
Verlag Mainz, 1960

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Chemnitz, 2009

Christopher Hübner